

# **Harvennushakkuun ja kunnostusojituksen vaikutus metsäojitetun suon hiilidioksidi- vuohon**

Sara Lankinen-Timonen  
Pro gradu -tutkielma  
Helsingin yliopisto  
Metsätieteiden osasto  
Metsien ekologia ja käyttö  
Maaliskuu 2019

<b>Tiedekunta</b> Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		<b>Osasto</b> Metsätieteiden osasto
<b>Tekijä</b> Sara Lankinen-Timonen		
<b>Työn nimi</b> Harvennushakkuun ja kunnostusojituksen vaikutus metsäojitetun suon hiilidioksidivuohon		
<b>Oppiaine</b> Metsien ekologia ja käyttö		
<b>Työn laji</b> Maisterintutkielma	<b>Aika</b> Maaliskuu 2019	<b>Sivumäärä</b> 60 s.
<b>Tiivistelmä</b> <p>Soilla on merkittävä rooli hiilen (C) varastoinnissa sekä kasvihuonekaasujen, kuten hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>) vaihdossa. Suoekosysteemeissä kasvit sitovat yhteytyksessään ja vapauttavat hengityksessään hiilidioksidia. Hiilidioksidia vapautuu takaisin ilmakehään lisäksi hajottajien hengityksen tuotteena. Nettomääräisesti luonnontilaiset suot sitovat hiilidioksidia, koska korkea pohjavedenpinnan taso rajoittaa maahan kertyvän orgaanisen aineen, eli turpeen hajotusta. Turpeesta vapautuvan hiilidioksidin määrä on kuitenkin muuttunut olennaisesti soiden ojituksen seurauksena, kun pohjavedenpinnan lasku on lisännyt hapellisen hajotuksen määrää turpeessa. Suomessa tehtiin runsaasti metsäojituksia erityisesti 1960–1970-luvulla. Nämä ojitetut turvemaat ovat tänä päivänä harvennushakkuiden ja kunnostusojituksen tarpeessa, mutta mittaustieto näiden toimenpiteiden välittömistä vaikutuksista hiilikaasujen vaihtoon on yhä vähäistä. Tietoa suometsien käytön ilmastovaikutuksista eri metsänhoitotoimien yhteydessä tarvitaan lisää.</p> <p>Tämän tutkielman tarkoitus oli selvittää vaikuttavatko harvennushakkuu ja kunnostusojitus metsäojitetulla suolla hiilidioksidivuohon ja sitä sääteleviin ympäristötekijöihin (pohjavedenpinnan taso, turpeen lämpötila). Tutkimusaineisto kerättiin Hyytiälän metsäasemalla Juupajoella sijaitsevalta metsäojitetulta suolta vuosina 2010–2013 ja 2015. Hiilidioksidivuota mitattiin suljetun kammion menetelmällä kasvillisilta mittauspisteiltä kokonaishengityksenä (R<sub>TOT</sub>) ja kasvittomilta heterotrofisena hengityksenä (R<sub>HET</sub>) seitsemällä koealalla. Harvennushakkuu tehtiin joulukuussa 2011 ja kunnostusojitus elokuussa 2012.</p> <p>Harvennushakkuulla ja kunnostusojituksella oli selvä vaikutus pohjavedenpinnan tasoon erityisesti ohutturpeisella koealalla. Harvennushakkuu nosti pohjavedenpintaa ja kunnostusojitus laski sitä hakkuuta edeltävälle tasolle tai sen alle. Turpeen lämpötilan suhteen toimenpiteiden vaikutus jäi vähäiseksi ja epäselväksi. Turpeen lämpötilassa ei ollut merkittäviä eroja vuosien tai koealojen välillä. Sekä turpeen lämpötila että pohjavedenpinnan taso säätelivät hiilidioksidivuota. Pohjavedenpinnan tason muutokset vaikuttivat kuitenkin voimakkaammin hiilidioksidivuohon kuin turpeen lämpötilan muutokset etenkin rehevämmillä kasvupaikoilla. Hiilidioksidivuoto reagoi selvästi toimenpiteisiin rehevämmillä kasvupaikoilla. Vuotuiset ennustetut hiilidioksidivuoto vaihtelivat vuosina 2011–2014 välillä 711–2414 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> (R<sub>HET</sub>) ja 1604–3519 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> (R<sub>TOT</sub>) kasvupaikasta riippuen. Vuotuisissa CO<sub>2</sub>-voissa oli selvää vaihtelua kasvupaikkojen välillä: rehevämmillä turvekangastyypeillä CO<sub>2</sub>-vuon määrä sekä vuosien välinen vaihtelu olivat suuremmat kuin karummilla.</p> <p>Harvennushakkuu ja kunnostusojitus yhdessä toteutettuna voivat tämän tutkimuksen perusteella lisätä merkittävästi hengityksestä aiheutuvaa hiilidioksidivuota metsäojitetulla suolla erityisesti rehevillä ja ohutturpeisemmillä kasvupaikoilla. Karummilla ja paksuturpeisilla kasvupaikoilla toimenpiteiden vaikutus näyttää sen sijaan jäävän vähäiseksi. Harvennushakkuu yksinään voi kuitenkin vähentää hiilidioksidivuota suon pinnasta nostaessaan pohjavedenpinnan tasoa.</p>		
<b>Avainsanat</b> Hiilidioksidi, suo, kunnostusojitus, harvennushakkuu, metsäojitus, kammiomittaus		
<b>Säilytyspaikka</b> Helda (Helsingin yliopiston sähköinen arkisto), Viikin tiedekirjasto		
<b>Muita tietoja</b> Ohjaaja: yliopistonlehtori Kari Minkkinen (HY)		

## Sisällysluettelo

1 JOHDANTO .....	4
1.1 Tausta.....	4
1.2 Respiraatio soiden hiilidioksidivaihdon osana ja siihen vaikuttavat tekijät.....	6
1.3 Ojituksen vaikutus suon ympäristötekijöihin ja hiilidioksidivuohon.....	9
1.4 Kunnostusojituksen vaikutus ojitetun suon ympäristötekijöihin .....	11
1.5 Harvennushakkuun vaikutus ojitetun suon ympäristötekijöihin .....	12
1.6 Työn tavoitteet .....	14
2 AINEISTO JA MENETELMÄT .....	15
2.1 Tutkimusalue.....	15
2.2 Harvennushakkuu ja kunnostusojitus.....	16
2.3 Mittaukset .....	17
2.3.1 Hiilidioksidivuo .....	17
2.3.2 Turpeen ja ilman lämpötila .....	18
2.3.3 Pohjavedenpinnan taso ja turpeen paksuus .....	18
2.3.4 Puusto.....	19
2.4 Aineiston käsittely.....	20
2.5 Aineiston laskenta ja analyysi.....	22
2.5.1 Turpeen lämpötila ja pohjavedenpinnan taso.....	22
2.5.2 Hiilidioksidivuo .....	23
3 TULOKSET .....	25
3.1 Puusto.....	25
3.2 Pohjavedenpinnan taso.....	25
3.3 Turpeen ja ilman lämpötila .....	28
3.4 Hiilidioksidivuo .....	31
3.4.1 Hetkellinen hiilidioksidivuo.....	31
3.4.2 Kausittainen hiilidioksidivuo .....	34
4 TULOSTEN TARKASTELU .....	38
4.1 Pohjavedenpinnan taso.....	38
4.2 Turpeen lämpötila .....	40
4.3 Hiilidioksidivuo .....	42
5 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	46
KIITOKSET.....	47
LÄHTEET.....	48
LIITTEET .....	58

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Suot ovat kostean yleisilmaston ylläpitämiä ekosysteemejä, joilla korkea pohjavedenpinnan taso rajoittaa maahan kertyvän orgaanisen aineen, eli turpeen hajotusta (Laine ja Vasander 1998). Soilla on merkittävä rooli hiilen (C) varastoinnissa sekä kasvihuonekaasujen, kuten hiilidioksidin ( $\text{CO}_2$ ), metaanin ( $\text{CH}_4$ ) ja typpioksiduulin ( $\text{N}_2\text{O}$ ) vaihdossa. Luonnontilaiset suot sitovat yhteytyksessään ilmakehän hiilidioksidia ja kerjyttävät turpeen hiilivarastoa, mutta toisaalta ne ovat myös merkittäviä metaanin lähteitä (Saarnio ym. 2007). Turpeeseen varastoitunutta orgaanista hiiltä vapautuu hajotuksen tuotteena takaisin ilmakehään hiilidioksidina ja metaanina. Ihmistoiminnan myötä soiden eri käyttömuodoilla on kuitenkin ollut merkittävä vaikutus turpeen hajoamiseen ja siten sekä hiilivarastoon että kasvihuonekaasujen vapautumiseen soilla (Minkkinen ym. 2002).

Ilmastonmuutoksen kiihtymisen seurauksena suot erityisesti hiilivarastoina sekä hiilidioksidinieluina ovat nousseet yhä tärkeämpään rooliin ilmastonmuutoksen hillinnässä. Ilmakehän keskimääräinen hiilidioksidipitoisuus on noussut vuoteen 2016 mennessä 45 % esiteollisesta ajasta eli vuodesta 1750 (WMO 2017), mikä on keskeinen syy ilmaston muutoksen kiihtymiselle. Hiilidioksidipitoisuus oli vuonna 2016 koko maailmassa keskimäärin 403,3 ppm (ppm = tilavuuden miljoonasosa), kun taas ennen teollistumista ilmakehän hiilidioksidipitoisuus pysyi alle 280 ppm viimeisten 800 000 vuoden ajan (WMO 2017). Hiilidioksidipitoisuuden nopeaan nousuun ovat vaikuttaneet erityisesti väestönkasvu, maankäytön muutokset, teollistuminen sekä fossiilisten polttoaineiden käyttö (WMO 2017). Suomessa luonnontilaisten soiden laajamittaisella ojituksella metsätalouksikäyttöön on ollut merkittävä vaikutus soilta vapautuvan hiilidioksidin määrään. Ojitus on lisännyt hiilidioksidin vapautumista turpeesta (Silvola 1986, Silvola ym. 1996) ja muuttanut soita hiilidioksidin lähteeksi nielun sijaan (Ojanen ym. 2013). On kuitenkin havaittu, että kasvupaikasta, ilmasto-oloista ja puustosta riippuen myös ojitettu suo voi säilyä hiilinieluna (Minkkinen ym. 2002, Lohila ym. 2011, Ojanen ym. 2013, Minkkinen ym. 2018).

Suomessa luonnontilaisia soita on ojitettu metsätalouskäyttöön 1900-luvun alusta lähtien. Ojitettujen soiden pinta-ala on nykyisellään 4,65 miljoonaa hehtaaria ja ojitettujen kangaiden 1,32 miljoonaa hehtaaria (Korhonen ym. 2017). Kaikkiaan soita on kuitenkin metsäojitettu vieläkin enemmän, sillä ohutturpeisia ojitusalueita on tähän päivään mennessä siirtynyt valtakunnan metsien inventoinnissa kivennäismaiden luokkaan (Korhonen ym. 2017). Erityisen runsaasti soiden uudisojituksia tehtiin 1960- ja 1970-lukujen taitteessa (Peltola 2014). Uudisojitus metsätalouden tarpeisiin käytännössä katsoen loppui 1990-luvulla (Peltola 2006).

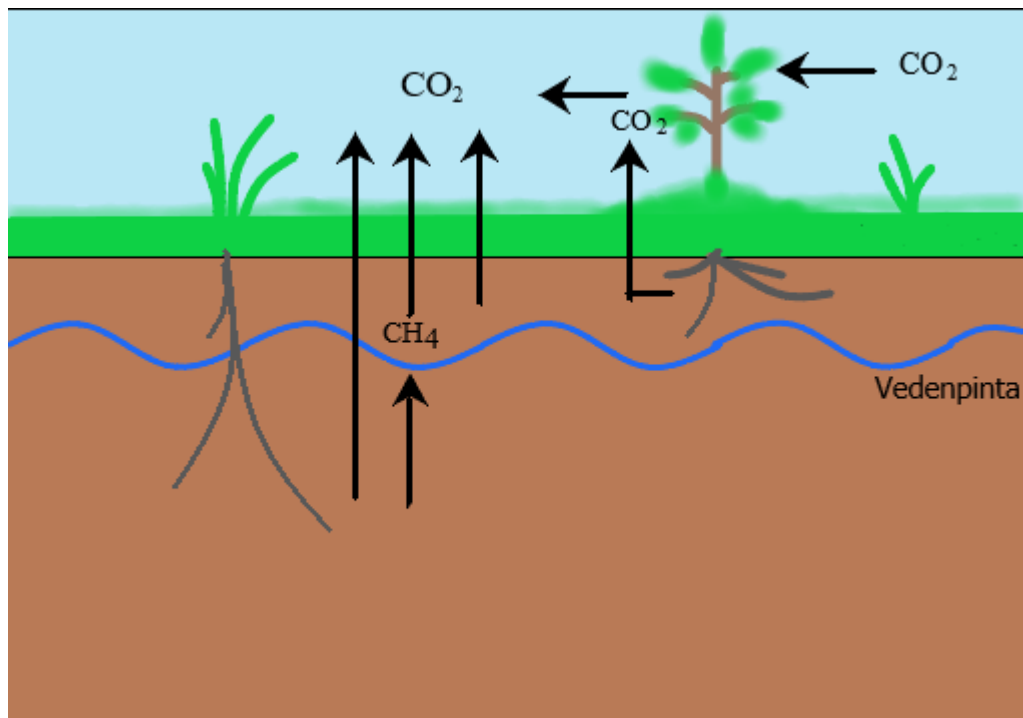
Ojitettuihin soihin kohdistuu tulevaisuudessa yhä suurempi paine metsänhoitotoimenpiteiden suhteen, sillä ne ovat saavuttaneet suurelta osin muun muassa harvennushakkuita ja kunnostusojituksia vaativan kasvatusvaiheen (Hökkä ym. 2002). Kaikista harvennushakkuista vuosina 2003–2012 on tehty suometsissä 20 %, ja valtakunnan metsien 11. inventoinnissa (VMI 11, inventointi 2009–2013) laadittujen hakkuuehdotusten perusteella 27 % harvennushakkuista tulisi kohdistua lähitulevaisuudessa suometsiin (Korhonen ym. 2017). VMI 11:n mukaan suometsien osuus jo myöhässä olevista harvennushakkuuehdotuksista oli lisäksi suurempi kuin kivennäismaiden. Kunnostusojituksia on tehty jo 1950-luvulta saakka (Sevola 1997), mutta 1990-luvun taitteessa määrä lähti selvään nousuun (Peltola 2004). Suoritettujen kunnostusojitusten määrä on ollut vuosina 1990–2013 vuosittain 55 000–82 000 ha (Peltola 2014). Kunnostusojituksen toteuttamiseen on kannustettu valtion taholta myöntämällä siihen kestävän metsätalouden määräraikaisen rahoituslain (34/2015 § 15) mukaista tukea tietyin kriteerein. VMI11:sta kunnostusojitustarpeessa olevien suometsien määrän arvioitiin olevan vuosille 2014–2023 1,1 miljoonaa hehtaaria, mikä vastaa 24 % ojitetusta suoalasta (Korhonen ym. 2017).

Ojituksen vaikutusta soiden hiilidioksidivuohon ja hiilitaseeseen on tutkittu paljon (esim. Silvola 1986, Martikainen ym. 1995, Silvola ym. 1996, Minkkinen ja Laine 1998a, Minkkinen ym. 2007b, Ojanen ym. 2010, 2013). Tutkimustietoa löytyy myös ojituksen sekä ojien kunnostuksen vaikutuksista turvemaiden valumavesien laatuun, erityisesti kiintoaineiden ja ravinteiden huuhtoutumisen suhteen (Joensuu ym. 2001, 2002, Nieminen ym. 2010, 2017). Sen sijaan ojitetuilla soilla tehtävien metsänhoidollisten toimenpiteiden vaikutuksista hiilidioksidivuohon tai muihin kasvihuonekaasuihin on vielä vähän tutkimusta, vaikka tiedon tarve on tunnustettu jo pitkään (Minkkinen ja Laine 2001). Tut-

kimuksia on tehty muun muassa suometsien avohakkuiden vaikutuksesta hiilidioksidivuohon (Mäkiranta ym. 2010, 2012) ja muihin kasvihuonekaasuihin (Huttunen ym. 2003), mutta mittaustieto harvennushakkuiden ja kunnostusojitusten vaikutuksista on yhä puutteellista. Suometsiin kohdistuva suuri hakkuu- ja kunnostusojituspaine kuitenkin edellyttää myös näiden toimenpiteiden ilmastovaikutusten selvittämistä etenkin, kun niiden tiedetään aiheuttavan muutoksia turvemaan olosuhteisiin.

## **1.2 Respiraatio soiden hiilidioksidivaihdon osana ja siihen vaikuttavat tekijät**

Suoekosysteemeissä kasvit sitovat yhteyttäessään ilman hiilidioksidia biomassansa, josta se päätyy edelleen karikkeena turpeeseen kertyen orgaanisen hiilen varastoksi. Hiilidioksidia puolestaan vapautuu soilta kasvien ja maaperäeliöiden hengityksen eli respiraation tuotteena (Kuva 1). Kasvien hengitys eli autotrofinen respiraatio käsittää kasvien maanpäällisen sekä maanalaisen osan eli juurten hengityksen (Minkkinen ym. 2007b). Turpeesta hiilidioksidia vapautuu juurten hengityksen ohella heterotrofisten maaperäeliöiden hengityksen (heterotrofinen respiraatio) tuotteena niiden hajottaessa turvetta, kasvien kuolleita juuria ja elävien juurten erittämiä yhdisteitä, sekä maanpinnalle kertynyttä uutta kariketta turpeen hapellisessa kerroksessa (hapellinen eli aerobinen hajotus) (Crow ja Wieder 2005). Turvemaakosysteemin kokonaisrespiraatio muodostuu sekä autotrofisesta että heterotrofisesta respiraatiosta. Hiilidioksidia muodostuu kuitenkin turpeessa lisäksi metanotrofisten bakteerien hapettaessa syvemmältä turpeesta diffundoituvaa metaania, jota muodostuu metanogeenisten arkkioiden hajottaessa turvetta hapettomissa oloissa eli anaerobisesti (Svensson ja Sundh 1992).



Kuva 1. Hiilidioksidivaihto suoekosysteemissä. Autotrofiset kasvit sitovat yhteytyksessään hiilidioksidia ilmasta biomassaansa. Samalla ne kuitenkin vapauttavat hiilidioksidia hengityksessään sekä maanpinnan yläpuolisista osistaan että turpeesta kasvavista juuristaan. Turpeesta vapautuu hiilidioksidia heterotrofisten hajottajien hajottaessa turvetta ja kariketta hapellisissa oloissa. Lisäksi osa hiilidioksidista on peräisin metanotrofien hapettamasta metaanista.

Turvemaaekosysteemin hengitykseen vaikuttaa monia bioottisia ja abioottisia tekijöitä. Hiilidioksidin vapautumista respiraationa säätelevät etenkin pohjavedenpinnan taso ja turpeen lämpötila (Moore ja Knowles 1989, Silvola ym. 1996, Minkkinen ym. 2007b, Ojanen ym. 2010). Pohjavedenpinnan taso määrää erityisesti hapellisen (akrotelma) ja hapettoman (katotelma) turvekerroksen paksuuden. Korkea pohjavedenpinnan taso aiheuttaa hapettomuutta turpeessa, mikä rajoittaa orgaanisen aineksen hapellista hajotusta (Jaatinen ym. 2008) ja siten heterotrofista hengitystä. Kasvien ja erityisesti puiden juuret kärsivät myös korkean pohjavedenpinnan aiheuttamasta hapettomuudesta, minkä vuoksi juurten kasvu rajoittuu pääasiassa akrotelmaan (Lieffers ja Rothwell 1987b). Poikkeuksena tästä ovat etenkin saramaiset kasvit, joilla juurten aerenkymisolukko mahdollistaa juuriston kasvun myös hapettomissa oloissa (Lloyd ym. 1998). Korkea pohjavedenpinta toisaalta myös rajoittaa ravinteiden saatavuutta mikrobien ja juurten käyttöön. Jo lyhytaikaisella, esimerkiksi kuivuudesta tai tulvista johtuvalla pohjavedenpinnan tason muutoksella on havaittu olevan vaikutusta suon pinnasta vapautuvan respiraation määrään (Martikainen ym. 1995, Laine ym. 2009) vaikuttaessaan esimerkiksi mikrobiyhteisöjen koostumukseen ja aktiivisuuteen (Jaatinen ym. 2007). Liiallinen maaperän kuivuus voi

myös rajoittaa hajottajamikrobien toimintaa ja turpeen hajotusta (Hogg ym. 1992, Mäkiranta ym. 2009).

Turpeen pintakerrosten lämpötila säätelee sekä heterotrofien että juurten hengitystä: korkeampi lämpötila kiihdyttää kasvien hengitystä sekä lisää mikrobien aktiivisuutta ja siten niiden hengityksen määrää (Silvola ym. 1996, Zogg ym. 1996, Minkkinen ym. 2007b). Turpeen lämpötilan vuodenaikainen vaihtelu selittää osaksi heterotrofisen respiraation ajallista vaihtelua (Minkkinen ym. 2007b).

Kasvupaikan ravinteisuustasolla ja kasvillisuudella on myös vaikutusta heterotrofiseen respiraatioon. Ravinteikkaimmilla kasvupaikoilla on yleisesti havaittu suurempia hiilidioksidipäästöjä kuin karummilla (Silvola ym. 1996, Minkkinen ym. 2007b, Ojanen ym. 2010). Tämä selittyy todennäköisesti kasvupaikkojen eroilla ravinteiden saatavuudessa ja karikkeen laadussa (Minkkinen ym. 2007b). Suolle tulevan karikkeen hajotettavuus vaikuttaa erityisesti hapellisten hajottajien aktiivisuuteen. Rahkasammalkarikkeen yhteydessä mikrobien entsyymiaktiivisuus on havaittu heikommaksi ja karikkeen hajotus hitaammaksi kuin putkilokasvien kohdalla (Strakova ym. 2011). Myös kasvien elävien juurten erittämällä yhdisteillä on vaikutus heterotrofiseen hengitykseen niiden kiihdyttäessä mikrobien kasvua ja aktiivisuutta, sillä ne ovat helposti hajotettavia yhdisteitä (Kuzyakov ja Cheng 2001, Crow ja Wieder 2005). Juurten hengityksellä on myös havaittu olevan positiivinen riippuvuus typen saatavuuteen maaperässä (Zogg ym. 1996).

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin lähinnä pohjavedenpinnan tason, turpeen pintakerrosten lämpötilan sekä kasvupaikan vaikutusta heterotrofiseen ja kokonaishengitykseen. Kuitenkin on hyvä tiedostaa muut taustalla olevat hengitykseen vaikuttavat tekijät.



### 1.3 Ojituksen vaikutus suon ympäristötekijöihin ja hiilidioksidivuohon

Luonnontilaisten soiden ojituksella, eli uudisojituksella, on pyritty parantamaan puuston kasvuolosuhteita alentamalla suon pohjavedenpinnan tasoa. Toimenpide onkin onnistuessaan muuttanut merkittävästi suoekosysteemejä. Vaikutukset ulottuvat suon hydrologiaan, maaperän ominaisuuksiin ja eliöstöön sekä kasvillisuuteen, ja näiden kautta ekosysteemin prosesseihin (Laine ym. 2006). Osa muutoksista on ollut havaittavissa heti ojituksen jälkeen, mutta toiset vasta vuosien kuluttua.

Ojitus on onnistuessaan vaikuttanut merkittävästi suon hydrologiaan laskemalla pohjavedenpinnan tasoa, mikä on nähtävissä heti ojituksen jälkeen (Lieffers ja Rothwell 1987a). Pohjavedenpinnan laskun seurauksena hapekkaan turvekerroksen osuus lisääntyy, mikä on aiheuttanut ojitetuilla soilla muutoksia turpeen ominaisuuksiin. Veden poistuminen ylempien turvekerrosten huokostilasta romahduttaa turpeen rakenteen ja aiheuttaa pintakerrosten painumista (Minkkinen ja Laine 1998a). Kasvavan puuston paino voi myös lisätä edelleen turvekerroksen painumista ja tiivistymistä (Minkkinen ja Laine 1998a). Pintaturpeen painuminen ojituksen jälkeen lisää turpeen tiheyttä ylemmissä turvekerroksissa (Laiho ja Laine 1994, Minkkinen ja Laine 1996, Minkkinen ja Laine 1998b), mikä puolestaan lisää turpeen vedenpidätyskykyä ja vähentää turpeen vedenläpäisevyyttä (Päivänen 1973). Turpeen painumisella on havaittu olevan yhteys kasvupaikan ravinteisuustason sekä turvekerroksen paksuuden kanssa (Minkkinen ja Laine 1998a). Ojitus on lisännyt myös turpeen pintakerrosten happamuutta (Minkkinen ym. 1999) orgaanisten ja epäorgaanisten yhdisteiden lisääntyneen hapetuksen sekä puuston lisääntyneen ravinteiden oton vaikutuksesta (Minkkinen ym. 2008).

Luonnontilaisiin soihin verrattuna turpeen pintakerroksen lämpötila voi hetkellisesti nousta heti ojituksen jälkeen (Lieffers ja Rothwell 1987a). Pidemmällä aikavälillä turpeen lämpötila kuitenkin laskee luonnontilaiseen verrattuna (Minkkinen ym. 1999, Venäläinen ym. 1999) lisääntyvän puuston varjostuksen takia ja lämmönjohtokyvyn heikentyessä kuivemmassa pintaturpeessa (Laine ym. 2006, Minkkinen ym. 2008).

Ojituksen aikaansaama vedenpinnan lasku on parantanut ravinteiden saatavuutta turpeessa, sillä sen ansiosta juuret ja hajottajat pystyvät hyödyntämään suurempaa osuutta turvekerroksesta. Toisaalta ojituksen seurauksena ravinteita huuhtoutuu valumavesien

mukana (Nieminen ym. 2017) ja lisääntynyt puusto vaikuttaa saatavuuteen ottaessaan ravinteita enemmän maaperästä ja sitoessaan ravinteita pidempään pois kierrosta (Laiho ym. 1999, Laiho ym. 2003). Toisaalta turpeen tiivistymisen seurauksena myös syvempien turvekerrosten ravinteet ovat eliöiden saavutettavissa (Laiho ym. 1999).

Uudisojitus käynnistää uudenlaisen kasvillisuussukcession kuivattaessaan suota. Kosteisiin olosuhteisiin sopeutunut suokasvillisuus alkaa taantua pian ojituksen jälkeen ja kiivennäismaiden kasvilajisto puolestaan alkaa vallata alaa ojitusalueelta (Laine ym. 1995, Minkkinen ym. 1999). Vedenpinnan lasku on parantanut kasvien, etenkin puuston, kasvuolosuhteita juuriston hyötyessä lisääntyneestä hapekkaasta kasvutilasta (Fraser ja Gardiner 1967, Finér ja Laine 1998). Ojituksen jälkeen sekä puiden että kenttäkerroksen kasvien juurten biomassassa on lisääntynyt merkittävästi lyhyelläkin aikavälillä (Laiho ja Finér 1996). Puuston maanpäällinen biomassan tuotos myös lisääntyy kasvuolosuhteiden paranemisen myötä. Puuston kasvun lisääntyessä osa suokasvilajistosta taantuu lisääntyneen varjostuksen vuoksi (Laine ym. 1995).

Kasvilajiston muutos vaikuttaa suolle tulevan karikkeen laatuun ja määrään (Laiho ym. 2003). Ojituksen jälkeen karikkeen määrä voi lisääntyä ja toisaalta karike muuttuu myös puupitoisemmaksi havupuiden karikkeen lisääntyessä, mikä voi hidastaa hajotusta (Laiho ym. 2003). Kasviyhteisön muutokset vaikuttavat pidemmällä aikavälillä karikkeen hajotettavuuden kautta mikrobiyhteisön koostumukseen (Jaatinen ym. 2007) ja aktiivisuuteen (Strakova ym. 2011), ja siten turpeen hajoamiseen. Ojituksen aiheuttamien muutosten voimakkuus vaikuttaa olevan riippuvainen kasvupaikan ravinteisuustasosta. Rehevämmillä suotyypeillä ojituksen aiheuttamat muutokset kasvilajistossa (Laine ym. 1995, Minkkinen ym. 1999) ja maaperän mikrobiyhteisöissä (Strakova ym. 2011) ovat näkyneet nopeammin kuin karummilla suotyypeillä.

Uudisojituksen aiheuttama turpeen hapellisen hajotuksen kiihtyminen on yleisesti lisännyt turpeesta vapautuvaa hiilidioksidivuota luonnontilaisiin soihin verrattuna (Silvola ym. 1986, Martikainen ym. 1995, Silvola ym. 1996). Suomessa ojitetuilla soilla suon pinnasta vapautuva kokonaishengityksestä peräisin oleva hiilidioksidivuoto on vaihdellut välillä 1165–4437 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> ja pelkästä heterotrofisesta hengityksestä välillä 534–2455

g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> kasvupaikasta riippuen (Ojanen ym. 2010). Ravinteikkaammilla turvekan-  
kailla hiilidioksidivuo on yleisesti suurempi kuin karummilla (Martikainen ym. 1995, Sil-  
vola ym. 1996, Minkkinen ym. 2007b, Ojanen ym. 2010).

#### **1.4 Kunnostusojituksen vaikutus ojitetun suon ympäristötekijöihin**

Kunnostusojitus on metsäojitetuilla turvemailla tehtävä metsänparannuksen työlaji, jonka tarkoituksena on palauttaa puuston kasvuille suotuisa vesitalous, mikäli ojien kunto on heikentynyt ja pohjavedenpinta on liian korkealla heikentäen puuston kasvuolosuhteita (Ahti ja Päivänen 1997, Sarkkola ym. 2013b). Kunnostusojituksen suoritustapoja ovat vanhojen ojien perkaaminen, uusien täydennysojien kaivaminen vanhojen ojien lomaan tai näiden molempien menetelmien yhdistäminen.

Tarvetta alkuperäisten ojien kunnostukselle voi syntyä ojien kunnon heiketessä ajan ku-  
luessa. Heikentyminen johtuu pääasiassa turpeen painumisesta, ojien seinämien romah-  
tamisesta, eroosiosta tai ojien tukkeentumisesta kasvillisuuden tai muun materiaalin takia  
(Paavilainen ja Päivänen 1995). Ojien kunnon heikentyminen voi johtaa siihen, etteivät  
ne enää ylläpidä pohjavedenpinnan tasoa riittävän syvällä puuston suotuisiin kasvuolo-  
suhteisiin nähden. Pohjavedenpinnan tulisi olla loppukesällä vähintään 35–40 cm syvyy-  
dellä, jotta puusto ei kärsisi maaperän liiallisesta märkyydestä ja hapettomuudesta (Sark-  
kola ym. 2012). Metsien hakkuut voivat myös aiheuttaa ojien kunnostustarvetta nostaes-  
saan pohjavedenpintaa, etenkin mitä voimakkaampaa puuston käsittely on (Heikurainen  
ja Päivänen 1970). Hakkuiden yhteydessä hakkuutähteet voivat myös tukkia ja hakkuu-  
koneet vaurioittaa ojia, mikä johtaa usein ojien vedenjohtokyvyn heikentymiseen. Näistä  
syistä käytännön metsänhoidossa kunnostusojitus suositellaan ajoittamaan hakkuiden yh-  
teyteen (Vanhatalo ym. 2015).

Kunnostusojituksella saadaan pääsääntöisesti laskettua pohjavedenpinnan tasoa turve-  
mailla (Ahti ja Päivänen 1997, Päivänen ja Sarkkola 2000, Koivusalo ym. 2008). Kohteen  
ominaisuuksilla on kuitenkin havaittu olevan merkitystä vaikutuksen suuruuteen. Koivu-  
salon ym. (2008) tutkimuksessa havaittiin turpeen paksuudella olevan tärkeä rooli kun-  
nostusojituksen onnistumisen suhteen: ojien perkaus laski pohjavedenpinnan tasoa erityi-  
sesti ohutturpeisilla turvemailla, kun taas paksuturpeisilla kohteilla sillä ei ollut selvää  
vaikutusta pohjavedenpinnan tasoon. Kunnostusojitus ei välttämättä kuitenkaan vaikuta

turpeen kosteusoloihin yhtä paljon kuin uudisojitus turpeen muuttuneiden ominaisuuksien takia (Sikström ja Hökkä 2016). Turpeen tiivistymisestä ja maatuneisuuden lisääntymisestä aiheutuneiden turpeen kohonneen vedenpidätyskyvyn ja heikentyneen vedenjohtavuuden (Päivänen 1973) vuoksi vedenpinnan tulisi olla syvemmällä kunnostusojituksen jälkeen verrattuna uudisojituksen tilanteeseen, jotta pintakerrosten kuivatustila olisi sama (Sarkkola ym. 2013a).

Kunnostusojituksella on onnistuttu lisäämään puuston tilavuuskasvua pohjavedenpinnan laskun seurauksena (Lauhanen ja Ahti 2001). Kunnostusojitus voi toisaalta lisätä myös ravinteiden huuhtoutumista ojitusalueelta valumavesien mukana (Joensuu ym. 2001, Nieminen ym. 2010). Ojien kunnostuksen vaikutuksesta turpeen lämpötilaan ei aiempia tutkimustuloksia ollut tiedossa.

Kunnostusojitusten yhteydessä tehtyjä hiilidioksidivuon mittaustuloksia ei myöskään ole tiedossa. Kunnostusojituksen aiheuttama pohjavedenpinnan lasku lisää kuitenkin turpeen hapellisen kerroksen osuutta, minkä seurauksena hiilidioksidivuo voi lisääntyä. Kunnostusojituksen jälkeen ojat voivat myös yltää syvempiin kerroksiin kuin uudisojituksen jälkeen turpeen pintakerrosten painumisen takia (Nieminen ym. 2010). Kunnostusojituksen mahdollisia vaikutuksia suon hiilidioksidivuohon ei voi suoraan verrata uudisojituksen aiheuttamiin muutoksiin lähtötilanteen ollessa hyvin erilainen turpeen ominaisuuksien suhteen. Lisäksi esimerkiksi Hoggin ym. (1992) mukaan syvemmät turvekerrokset ovat pintakerroksia vastustuskykyisempiä hajotukselle hapekkaissakin oloissa. Lisäksi ne turvekerrokset, jotka ovat altistuneet pitkiä aikoja hapelliselle hajotukselle, ovat vastustuskykyisiä hajotukselle jatkossa (Hogg ym. 1992). Liiallinen kuivuus voi myös rajoittaa hengitystä, mikäli pohjavedenpinta laskee hyvin alas (Hogg ym. 1992, Mäkiranta ym. 2009).

## **1.5 Harvennushakkuun vaikutus ojitetun suon ympäristötekijöihin**

Harvennushakkuu on metsänhoidollinen hakkuumenetelmä, jossa kasvatettavasta puustosta poistetaan heikoimmat yksilöt tavoitteena parantaa jäljelle jäävän puuston kasvuolosuhteita ja siten metsikön tulevaa puuntuotosta. Puustoa harvennettaessa vähennetään jäljelle jäävän puuston keskinäistä kilpailua valosta ja ravinteista. Tapion hyvän metsänhoidon suosituksissa suometsien hoitoon ohjeistetaan korjuuolosuhteiden haastavuuden

vuoksi tekemään harvennushakkuu turvemailla enintään 1-2 kertaa metsikön kiertoajan aikana kasvupaikasta riippuen (Vanhatalo ym. 2015). Ensimmäinen harvennus ohjeistetaan tekemään normaalina tai voimakkaana (puuston poistuma 35–50 %).

Hakkuiden on yleisesti havaittu nostavan pohjavedenpinnan tasoa suometsissä (Heikurainen ja Päivänen 1970, Päivänen ja Sarkkola 2000, Huttunen ym. 2003, Mäkiranta 2003, Mäkiranta ym. 2010). On kuitenkin selvää, että hakkuun pohjavedenpinnan tasoa nostavan vaikutuksen suuruus riippuu hakattavan puuston määrästä (Heikurainen ja Päivänen 1970, Päivänen ja Sarkkola 2000). Sarkkolan ym. (2010) tutkimuksessa havaittiin ojite-  
tuilla soilla puuston tilavuuden ja pohjavedenpinnan tason välillä selvä yhteys; puuston tilavuus oli tärkein yksittäinen tekijä selittämään pohjavedenpinnan syvyyttä. Puuston merkittävä rooli suon vesitaseen säätelyssä perustuu sen haihduttavaan vaikutukseen: puuston määrän pienentyessä myös haihdunta vähenee, minkä seurauksena pohjavedenpinnan taso voi nousta (Sarkkola ym 2010).

Hakkuut voivat nostaa turpeen pintakerrosten lämpötilaa puuston varjostuksen vähentyessä (Huttunen ym. 2003, Mäkiranta 2003, Mäkiranta ym. 2010). Turvemailla harvennushakkuiden yhteydessä tehdyistä lämpötilamittauksista on tiedossa vain Mäkirannan (2003) tutkimus, jossa harvennushakkuulla ei kuitenkaan ollut vaikutusta turpeen lämpötilaan. Avohakkuun sen sijaan on havaittu nostavan maaperän lämpötilaa turvemailla (Huttunen ym. 2003, Mäkiranta ym. 2010). Harvennushakkuun vaikutusta hiilidioksidivuohon ja sitä sääteleviin tekijöihin on tutkittu enemmän kivennäismailla (Londo ym. 1999, Tang ym. 2005, Sullivan ym. 2008). Kivennäismailla puuston harvennukset ovat nostaneet hieman kasvukauden aikaista maaperän lämpötilaa (Londo ym. 1999, Sullivan ym. 2008). Tutkimusten tulokset hiilidioksidivuon suhteen ovat kuitenkin ristiriitaisia, sillä London ym. (1999) tutkimuksessa hiilidioksidivuoto oli lisääntynyt harvennushakkuussa, kun taas Sullivanin ym. (2008) tutkimuksessa hieman vähentynyt. Tangin ym. (2005) tutkimuksessa harvennuksella ei ollut selvää vaikutusta todelliseen hiilidioksidivuohon, vaikkakin mallinnuksessa vuo näytti vähenevän.

Harvennushakkuun vaikutus turpeen hiilidioksidivuohon on monitahoinen. Mahdollisen turpeen lämpötilan nousun tulisi kiihdyttää turpeen hajotusta, mutta toisaalta vedenpinnan nousu puuston haihdutuksen vähentymisen myötä voi samanaikaisesti rajoittaa hapellista hajotusta. Samoin puuston poistamisesta aiheutuva puiden juurten kuoleminen

voisi vähentää juuriston autotrofista hengitystä, mutta toisaalta samalla lisätä hetkellisesti juurikariketta heterotrofeille hajotettavaksi ja siten kiihdyttää niiden hengitystä (Tang ym. 2005, Sullivan ym. 2008). Lisäksi puuston poistaminen aiheuttaa muutoksia maanpäällisen karikkeen määrään, esimerkiksi hakkutähteiden lisätessä sitä hetkellisesti. Hakkuutähteet voivat paikallisesti lisätä kokonaisrespiraatiota kiihtyneen orgaanisen aineksen hajotuksen seurauksena (Mäkiranta ym. 2012).

## **1.6 Työn tavoitteet**

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää, kuinka harvennushakkuu ja kunnostusojitus vaikuttavat hiilidioksidin vapautumiseen suon pinnasta ilmakehään metsäojitetulta suolta. Tavoitteena on myös selvittää ympäristötekijöiden (lämpötila, pohjavedenpinta) ja hiilidioksidivuon muutosten välinen yhteys. Ympäristötekijöiden ja hiilidioksidivuon mahdollisia muutoksia tarkastellaan myös eri turvekangastyypin välillä.

Tutkimuksen hypoteesit ovat:

1. Harvennushakkuu nostaa pohjavedenpinnan tasoa, mikä vähentää hiilidioksidivuota.
2. Kunnostusojitus laskee pohjavedenpinnan tasoa, mikä lisää hiilidioksidivuota.
3. Harvennushakkuu nostaa turpeen pintakerrosten lämpötilaa.
4. Muutokset pohjavedenpinnan, turpeen lämpötilan ja hiilidioksidivuon suhteen ovat rehevämmillä turvekangastyypeillä suuremmat kuin karummilla.

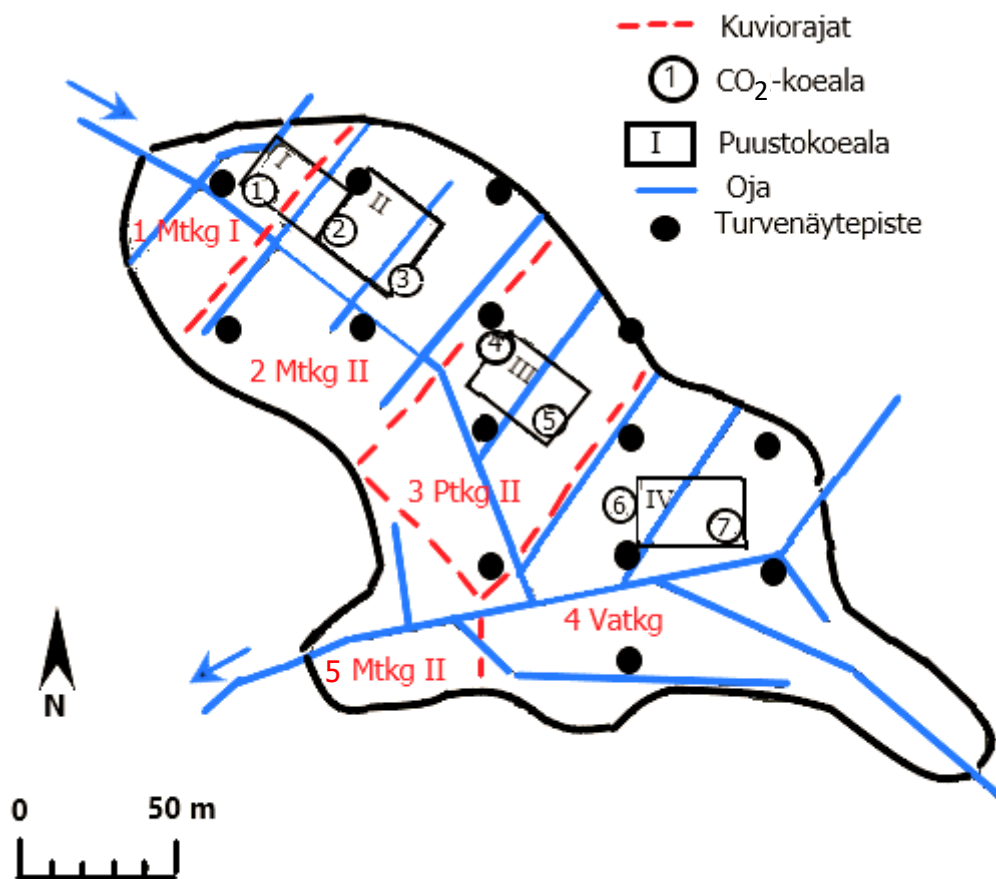
Tämän tutkielman tavoitteena on lisäksi vastata tiedon tarpeeseen harvennushakkuun ja kunnostusojituksen vaikutuksista kasvihuonekaasujen vapautumiseen ojitetuilla soilla.

## 2 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 2.1 Tutkimusalue

Tutkimuksen kohteena oli Hyytiälän metsäasemalla Juupajoella (61°50' N, 24°17' E) sijaitseva suo, Kotisuo. Suon pinta-ala on kaksi hehtaaria, ja sen valuma-alue kattaa kaikkiaan 25 hehtaaria. Kotisuo uudisojitettiin arviolta 1960-luvun puolivälissä. Ennen ojitusta Kotisuo oli kokonaisuudessaan hyvin vähäpuustoinen suo. Suon läpi kulkee valtaoja, jonka molemmin puolin on sarkaojia noin 30 metrin välein. Kotisuolla on ollut tutkimustoimintaa myös ennen tätä tutkimusta. Havaintojen mukaan Kotisuon puustoa ei ole käsitelty metsänhoidollisin menetelmin, mutta suolla on ollut aiempiin tutkimuksiin liittyviä koealoja, joilta puustoa on poistettu. Aiemmat tutkimuskoealat sijaitsivat suon läpi menevän valtaojan pohjoispuolella.

Kotisuo on kasvillisuudeltaan hyvin vaihteleva, minkä vuoksi se jaettiin viiteen kuvioon turvekangastyypin (Laine ja Vasander 2005) perusteella (Kuva 2). Kotisuon luoteisosassa kuvioilla 1 ja 2 on rehevää mustikkaturvekangastyypistä (Mtkg I ja II) sekametsää, jonka luoteisin osa oli ennen kunnostusojitusta hyvin märkä. Puusto oli ennen harvennusta hyvin tiheää (yli 7000 runkoa/ha) ja kokojakaumaltaan vaihtelevaa. Päävalta-puuna oli mänty (*Pinus sylvestris*), lisävaltapuina hieskoivu (*Betula pubescens*) ja kuusi (*Picea abies*), lisäksi kuusta oli alikasvoksena. Suon keskiosa (kuvio 3) on hieman karumpaa puolukkaturvekangasta (Ptkg II), jonka puuston muodostivat mänty ja koivu sekä kuusi alikasvoksena. Kuvio 4 on suurimmaksi osaksi mäntyvaltaista varputurvekangasta (Vatkg). Suon reunat ovat kuitenkin tälläkin osalla rehevämpiä. Kuvio 5 on ohutturpeista mustikkaturvekangasta. Kuviolla 5 ei kuitenkaan sijainnut hiilidioksidimittauksen koealoja, vaan kaikki tämän tutkimuksen koealat sijaitsivat kuvioilla 1-4.



Kuva 2. Havainnepiirros koejärjestelystä. Mittakaava on suuntaa antava.

## 2.2 Harvennushakkuu ja kunnostusojitus

Kotisuolla tehtiin harvennushakkuu joulukuussa 2011. Harvennushakkuu suoritettiin metsurityönä ja puut ajettiin pois suolta helmi-maaliskuussa 2012. Ojalinjoja käytettiin hakkuussa ajourina. Hakkuutähteet jätettiin koelalle, mutta ne poistettiin hiilidioksidimittauspisteiltä.

Harvennusohjeena oli laatupainotteinen alaharvennus. Lisäksi alikasvoskuusikkoa harvennettiin siten, että siitä muodostuisi seuraava pääpuusto aikanaan mäntyjen ja koivujen poistamisen jälkeen. Kuviolla 3 haluttiin kasvattaa pääosin mäntyä, mutta hyvälaatuiset koivut ja kuuset säästettiin myös. Kuvion 4 keskiosan karuhkolla varputurvekankaalla tehtiin alaharvennus männyille. Rehevämmillä reunaosilla voitiin jättää myös kuusta ja koivua kasvamaan. Harvennuksen tarkoituksena oli erityisesti säilyttää puuston erikoisrakenne, eikä tasata sitä. Ennakkoraivausta voitiin tehdä erityisesti harvennettavien



puiden ympäriltä, mikäli se koettiin hyödylliseksi. Kuitenkin niin, että alikasvoskuusta tuli jätetyksi suolle luonnonhoidollisista syistä.

Kunnostusojitus suoritettiin elokuun lopussa vuonna 2012. Kunnostusojituksessa kaikki Kotisuon aiemmin tehdyt ojat perattiin kaivinkoneella. Täydennysojitusta ei tehty ollenkaan. Ojien syvyys oli kunnostuksen jälkeen 80–100 cm.

## **2.3 Mittaukset**

### ***2.3.1 Hiilidioksidivuoto***

Turpeen hiilidioksidivuon (eli respiraation) mittaukset aloitettiin Kotisuolla kesäkuussa 2010. Mittaukset tehtiin vuosittain kesäaikaan sijoittuen toukokuun ja lokakuun väliin. Mittauksia suoritettiin vuosina 2010–2013 ja 2015. Vuonna 2015 mittauskertoja oli vain muutama. Mittauksia tehtiin näin ollen viitenä vuonna: kahtena kesänä ennen harvennushakkuuta (kontrollijakso), kesällä hakkuun ja kunnostusojituksen välissä sekä kahtena kesänä kunnostusojituksen jälkeen.

Hiilidioksidivuota turpeesta ilmakehään mitattiin seitsemältä koealalta (Kuva 2), joilla jokaisella oli viisi saroilla sijaitsevaa mittauspistettä. Kolmessa pisteessä mitattiin heterotrofista hengitystä ( $R_{\text{HET}}$ ). Näihin mittauspisteisiin asennettiin kesäkuun alussa 2010 20–30 cm syvä metallinen kaulus, jonka tarkoitus oli katkoa juuret ja täten poistaa elävien juurten (autotrofinen) hengitys. Samasta syystä myös kasvien maanpäälliset osat poistettiin näiltä pisteiltä aina ennen mittauksia. Kaksi matalaa (2 cm) kaulusta sijoitettiin häiriintymättömiin, kasvillisiin pisteisiin, joissa sekä autotrofinen että heterotrofinen hengitys (=kokonaishengitys,  $R_{\text{TOT}}$ ) olivat mukana.

Mittausmenetelmänä käytettiin suljettua kammiomittausta, joka on yksi kasvihuonekaasujen päämittausmenetelmistä (Alm ym. 2007). Mittaukset tehtiin kannettavalla hiilidioksidimittalaitteella (EGM-4, PPsystems Inc.), johon oli liitetty sylinterin muotoinen läpinäkymätön kammio (halkaisija 31,5 cm, korkeus 14,9 cm). Kammio asennettiin tiiviisti maahan asennettuihin kauluksiin. EGM-4-mittalaite kierrätti kaasua kammion ja mitta-

laitteen välillä ja mittasi hiilidioksidipitoisuutta (ppm) kullakin ajanhetkellä (s). Mittaukset tehtiin 81 sekunnin jaksoissa jokaiselta mittauspisteeltä. Mittauskertoja oli sulan maan aikoina noin kymmenen päivän välein.

### ***2.3.2 Turpeen ja ilman lämpötila***

Hiilidioksidimittausten yhteydessä koealoilta mitattiin turpeen lämpötila (°C) 5 cm:n syvyydeltä (T5) maan pinnasta nähden sekä ilman lämpötila (°C). Turpeen lämpötila mitattiin manuaalisesti jokaiselta koealalta aina hiilidioksidimittausten yhteydessä lämpötila-anturilla. Lisäksi jokaisella hiilidioksidikoealalla oli jatkuvatoimiset lämpötila-anturit (i-Button DS1921G, Maxim Integrated Products) sekä kasvillisessa että kasvittomassa mittauspisteessä. Lämpötila-anturit mittasivat lämpötilaa viiden senttimetrin syvyydeltä tunnin välein.

Ilman lämpötila mitattiin myös manuaalisesti jokaisen hiilidioksidimittauksen yhteydessä varjosta kammion vierestä noin metrin korkeudelta. Sen lisäksi koealoilla 3 ja 7 oli puuhun sijoitettuna noin 1,5 metrin korkeudessa lämpötila-anturit, jotka mittasivat jatkuvatoimisesti ilman lämpötilaa tunnin välein.

### ***2.3.3 Pohjavedenpinnan taso ja turpeen paksuus***

Koealoilta mitattiin pohjavedenpinnan etäisyys (WT) turpeen pinnasta (cm). Pohjavedenpinta mitattiin jokaisen hiilidioksidimittauksen yhteydessä jokaisella koealalla sijaitsevasta pohjavesikaivosta. Lisäksi pohjavedenpintaa mittasi kaksi jatkuvatoimista anturia (WT-HR 64K), joista toinen oli sijoitettu koealalle 3 (WT3) ja toinen koealalle 6 (WT6).

Kesällä 2012 Kotisuolta otettiin turvenäytteet pinnasta pohjaan ja määritettiin turpeen paksuus 40 × 40 m välein. Näytepisteitä oli yhteensä 14 kpl kuvioilla 1-4 (Kuva 2). Näytepisteet vaaittiin. Turpeen paksuus vaihteli runsaasti kuvioiden sisällä sekä kuvioiden välillä (Taulukko 1). Turvekerros oli paksuimmillaan karuimmilla kasvupaikoilla. Varputurvekankaalla turvekerros oli selvästi paksumpi kuin muilla kasvupaikkatyypeillä. Rehevämmät kasvupaikat olivat selvästi ohutturpeisempia kuin karummat kasvupaikkatyypit.

Taulukko 1. Turvekerroksen paksuuden vaihteluväli kuvioittain sekä hiilidioksidikoealojen sijoittuminen kuvioille (n = näytepisteiden lukumäärä).

Kuvio	Turvekangastyyppi	CO <sub>2</sub> -koeala	Turpeen syvyyden vaihteluväli, cm	n
1	Mtkg I	1	40	1
2	Mtkg II	2, 3	50-100	4
3	Ptkg II	4, 5	60-260	4
4	Vatkg	6, 7	60-500	5

### 3.3.4 Puusto

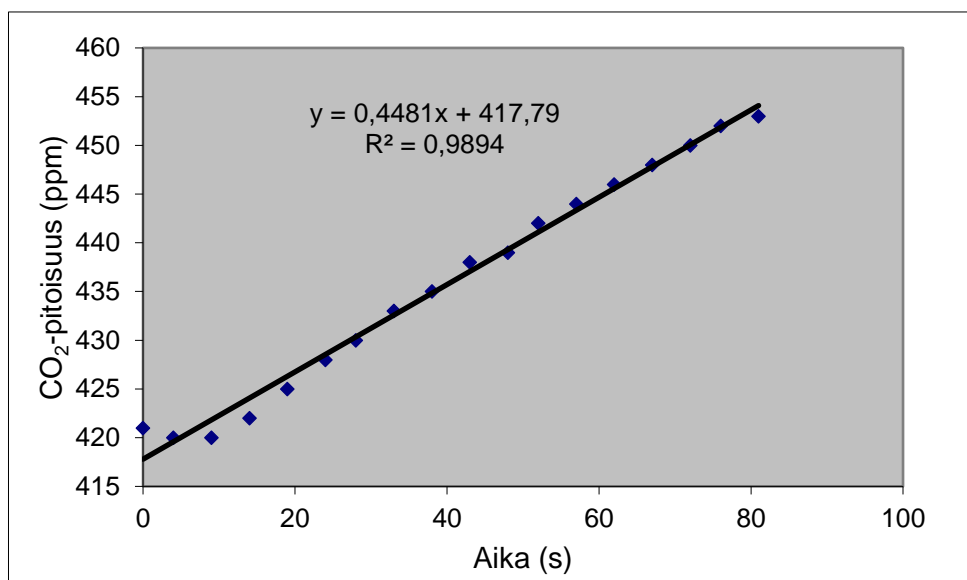
Kotisuolle perustettiin heinäkuussa 2010 neljä puustokoealaa, joilla tehtiin puustomitaukset (Kuva 2). Jokaisella kuviolla 1-4 oli yksi puustokoeala. Koealat pyrittiin sijoittamaan niin, että jokaisen läpi kulkee oja. Kuvioilla 1, 3 ja 4 koealojen koko oli 20×30 metriä (600 m<sup>2</sup>) ja kuviolla 2 30×30 metriä (900 m<sup>2</sup>). Puustokoealat merkittiin maastoon nurkkapaaluin.

Puusto mitattiin ensimmäisen kerran heinäkuussa 2010. Kaikki koealojen puut merkittiin numerolapuun ja jokaiselle puulle määritettiin puustotunnukset (puulaji, rinnankorkeusläpimitta, pituus, latvusraja) sekä tehtiin huomioita puun ulkomuodosta. Lämpimitta mitattiin talmeterillä puun numerolapun yläreunasta, joka oli 1,3 metrin korkeudella. Pituus ja tarvittaessa latvusraja mitattiin Vertex-mittalaitteella. Latvusraja mitattiin, jos rinnankorkeusläpimitta oli yli 3 cm.

Kesällä 2012 puusto mitattiin uudelleen talvella 2011 tehdyn harvennuksen jäljiltä. Kaikki jäljelle jääneet puut luettiin ja sen perusteella laskettiin jäljelle jääneen puuston tilavuus (m<sup>3</sup>/ha) ja puuston poistuma (m<sup>3</sup>/ha). Mikäli jäljelle jääneestä puusta puuttui numero, määritettiin todennäköisin puu vanhan listan mukaan ja laitettiin uusi numerolappu puuhun.

## 2.4 Aineiston käsittely

Hetkellinen hiilidioksidivuoto ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) saatiin suoraan EGM-4-mittalaitteen laske-  
mana. Mittalaite sovittaa automaattisesti lineaarisen regressiosuoran hiilidioksidipitoi-  
suuden (ppm) ja kuluneen ajan (s) välille sekä laskee maasta tulevan hiilidioksidivuon  
muodostamansa regressiosuoran kulmakertoimen eli hiilidioksidipitoisuuden muutoksen  
avulla. Mittausaineisto tarkastettiin mahdollisten virheiden ja epälineaarisuuksien suh-  
teen, sillä hiilidioksidipitoisuuden voitiin olettaa lisääntyvän kammiossa lähes lineaari-  
sesti lyhyen mittausjakson (81 s) aikana. Virheet saattoivat johtua esimerkiksi mittalait-  
teen tallennushäiriöstä tai siitä, ettei kammio ollut täysin paikallaan. Yleensä virheellisiä  
arvoja esiintyi mittausten alussa, esimerkiksi korkeampina tai pienempinä arvoina  
(Kuva 3).



Kuva 3. Esimerkkikuvaaja EGM-mittalaitteen mittaamasta hiilidioksidipitoisuudesta kullakin hetkellä. Pistejoukkoon on sovitettu regressiosuora, joka kuvaa hiilidioksidipitoisuuden muutosta. Hetkellinen hiilidioksidivuoto saatiin suoran kulmakertoimen avulla. Kuvan tilanteessa ensimmäiset kaksi arvoa poistettiin, mikä aiheutti muutoksen suoran kulmakertoimeen.

Virheelliset pitoisuusarvot poistettiin. Tämä korjaus muutti regressiosuoran kulmakero-  
rinta. Korjattu hiilidioksidivuoto saatiin kertomalla EGM-mittalaitteen laskema vuo uuden  
ja alkuperäisen kulmakertoimen suhteella. Virheellisyyttä aiheutui myös tallennusvir-  
heistä, joissa joidenkin pitoisuusarvojen kohdalle oli tallentunut vain nolla-arvoja. Myös

näissä tapauksissa vuota korjattiin samalla tavalla. Muutamissa tapauksissa sama mittauspiste oli mitattu kahteen kertaan, koska ensimmäinen mittaus oli epäonnistunut. Näissä tapauksissa vain uusintamittaus otettiin mukaan lopulliseen aineistoon. Osaa mittauksista (66 kpl, 4,3 %) ei pystytty korjaamaan niiden ollessa selkeästi virheellisiä, joten ne hylättiin aineistosta.

Kaikille hetkellisille hiilidioksidivuoarvoille tehtiin lämpötilakorjaus jälkikäteen. EGM-4-mittalaite olettaa kammiossa olevan ilman lämpötilaksi + 25 °C, mikä saattaa poiketa hyvinkin paljon todellisesta ilman lämpötilasta aiheuttaen näin virhettä vuovarvoon. Tästä syystä hetkellistä hiilidioksidivuota korjattiin mitatusta ja oletetusta ilman lämpötilasta muodostetulla lämpötilakertoimella

$$R_L = (273,15 + T_{\text{Oletettu}}) / (273,15 + T_{\text{Ilma}}) \times R_M ,$$

missä:

$$R_M = \text{Mitattu CO}_2\text{-vuo, g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

$$T_{\text{Oletettu}} = \text{Oletettu ilman lämpötila kammiossa, } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{Ilma}} = \text{Mitattu ilman lämpötila, } ^\circ\text{C}$$

$$R_L = \text{Lämpötila korjattu CO}_2\text{-vuo, g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Ilman lämpötilana vuon korjauksessa käytettiin jatkuva-aikaista lämpötila-aineistoa koealoilta 3 ja 7. Koealojen 1-4 vuovarvojen korjaukseen käytettiin koealalla 3 sijainneelta lämpötila-anturilta saatua aineistoa. Koealojen 5-7 kohdalla korjaukseen käytettiin koealan 7 lämpötila-anturin lämpötila-aineistoa. Mikäli kummaltakaan koealalta ei ollut jatkuva-aikaista aineistoa käytettävissä, käytettiin ilman lämpötilana manuaalisesti mitattua ilman lämpötilaa. Jos manuaalimittaustakaan ei ollut, niin ilman lämpötilana käytettiin viereisen SMEAR-aseman tornista mitattua ilman lämpötilaa 4,2 metrin korkeudelta.

Lämpötilakorjauksen jälkeen hetkellistä hiilidioksidivuota korjattiin tarvittaessa vielä kammion korkeuden suhteen. Kaulusten korkeuksissa oli vaihtelua saman mittauspisteen eri mittauskertojen välillä, mikä aiheutti kammion tilavuuteen muutosta. Näiden mittaus-  
ten vuoarvoille (16 kpl) tehtiin siten vielä korkeuskorjaus erillisellä kertoimella:

$$R_H = ((h + \Delta h) / h) \times R_L,$$

missä:

$h$  = kammion korkeus, cm

$\Delta h$  = kammion korkeuden muutos, cm

$R_L$  = lämpötilakorjattu CO<sub>2</sub>-vuo, g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>

$R_H$  = korkeuskorjattu vuo, g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>

Korkeuskorjauksen jälkeen saatu hiilidioksidivuon arvo ( $R_H$ ) oli lopullinen mallinnuk-  
sessa käytetty hetkellisen hiilidioksidivuon arvo (g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

## 2.5 Aineiston laskenta ja analyysi

### 2.5.1 Turpeen lämpötila ja pohjavedenpinnan taso

Hiilidioksidivuon mallinnuksessa ja ennusteissa turpeen lämpötilana käytettiin jatkuva-  
aikaisesti mitattua lämpötilaa, sillä manuaalimittauksissa oli huomattavasti enemmän  
aukkoja. Jos jatkuva-aikaisista mittauksista puuttui lämpötila-arvoja mittaushetkelle, niitä  
paikattiin manuaalisilla mittauksilla. Turpeesta mitatun lämpötilan (°C) perusteella las-  
kettiin vuotuinen lämpösumma (d.d. > 0 °C) pinnoittain ja koealoittain.

Pohjavedenpinnan tasona käytettiin hiilidioksidivuon mallinnuksessa manuaalisia koe-  
alakohtaisia mittauksia, joiden aukkoja paikattiin jatkuva-aikaisilla mittauksilla koe-  
aloilta 3 ja 6. Hiilidioksidivuon ennusteissa pohjavesiaineistona käytettiin jatkuva-aikai-  
sia mittauksia. Jatkuva-aikaisessa mittausaineistossa oli joitakin aukkoja, joiden arvot es-  
timitiin lineaarisesti interpoloimalla.

## 2.5.2 Hiilidioksidivuoto

Hetkellistä hiilidioksidivuota selitettiin turpeesta 5 cm:n syvyydeltä mitatulla lämpötilalla (T5) sekä pohjavedenpinnan tasolla (WT). Hiilidioksidivuon ( $R_H$ ) ja ympäristötekijöiden (turpeen lämpötila, pohjavedenpinnan taso) vuorosuhteita tarkasteltiin regressioanalyysillä R-tilasto-ohjelmalla nls-funktion avulla koealoittain ja pinnoittain (kasvi/turve).

Hiilidioksidivuon ja turpeen lämpötilan välille sovitettiin eksponentiaalinen regressiokäyrä kuvaamaan vuorosuhdetta, jonka yhtälö oli muotoa:

$$R = a \times e^{b \times T5},$$

missä:

$R$  = hiilidioksidivuoto turpeen pinnasta,  $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

$a, b$  = mallin parametrit

$T5$  = turpeen lämpötila 5 cm syvyydellä turpeen pinnasta,  $^{\circ}\text{C}$

Tätä yhtälöä käytettiin mallina (=”lämpötilamalli”), jolla ennustettiin hiilidioksidivuota. Lämpötilamallin residuaaleja tarkasteltiin mallin estimaattien suhteen mallin harhattoisuuden tarkastamiseksi.

Lämpötilamallin residuaaleja tarkasteltiin myös pohjavedenpinnan tason suhteen. Tarkoituksena oli selvittää, selittäisikö pohjavedenpinnan taso myös osan hiilidioksidivuosta turpeen lämpötilan lisäksi. Pohjavedenpinnan tason hiilidioksidivuota selittävän vaikutuksen huomioimiseksi muodostettiin uusi malli (=”yhdistelmämalli”), jossa selittävinä muuttujina olivat sekä turpeen lämpötila että pohjavedenpinnan taso. Yhdistelmämalli oli muotoa:

$$R = a \times e^{b \times T5} + (c \times WT),$$

missä:

$R$  = hiilidioksidivuoto turpeen pinnasta,  $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

$a, b, c$  = mallin parametrit

$T5$  = turpeen lämpötila 5 cm syvyydellä turpeen pinnasta,  $^{\circ}\text{C}$

$WT$  = pohjavedenpinnan etäisyys turpeen pinnasta, cm

Yhdistelmämallille estimoitiin parametriarvot ja residuaalit (= yksittäisen havainnon arvon etäisyys regressiosuorasta). Residuaaleja verrattiin taas mallin estimaatteihin ja niiden regression avulla tarkastettiin mallin harhattomuus.

Malleilla estimoitiin jatkuva-aikaisia turpeen lämpötilan ja pohjavedenpinnan tason mittauksia hyödyntäen tunneittainen hiilidioksidivuoto ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) jokaiselle koealalle sekä kasvillisille että kasvittomille pinnoille. Yhdistelmämallia käytettiin niillä koealoilla, joiden kohdalla mallin c-parametrin p-arvo oli alle 0,05, eli pohjavedenpinnan taso oli tilastollisesti merkitsevä mallissa. Jos c parametrin p-arvo oli yli 0,05, käytettiin pelkkää lämpötilamallia. Tunneittaisesta hiilidioksidivuosta estimoitiin yhteen laskemalla edelleen vuotuiset hiilidioksidivuot ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ v}^{-1}$ ). Vuotuiset vuot estimoitiin vuosille 2011–2014, joilta oli olemassa koko vuodelta jatkuva-aikainen turpeen lämpötilan ja pohjavedenpinnan mittausaineisto. Koealojen välisiä eroja tarkasteltiin keskivirheen ja 95 %:n luottamusvälin avulla.



## 3 TULOKSET

### 3.1 Puusto

Puuston määrä vaihteli selvästi turvekangastyypin välillä. Rehevimmät mustikkaturvekangastyypin kuviot 1 ja 2 olivat selkeästi runsaspuustoisemmat kuin karummat kuviot 3 (Ptkg II) ja 4 (Vatkg) (Taulukko 2). Ennen harvennusta eniten puustoa oli koealalla 1 (320 m<sup>3</sup>/ha) ja vähiten koealalla 4 (165 m<sup>3</sup>/ha). Harvennushakkuu tasoitti turvekangastyypin välisiä eroja puuston tilavuudessa. Puuston määrä väheni harvennushakkuussa 56–176 m<sup>3</sup>/ha eli 34–55 % kuviosta riippuen. Puuston tilavuus vaihteli kuvioiden kesken harvennuksen jälkeen välillä 109–151 m<sup>3</sup>/ha.

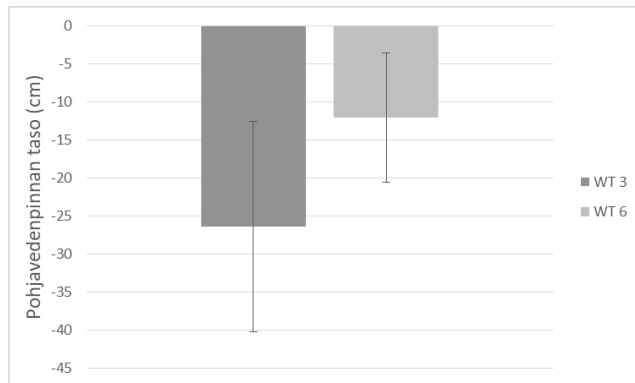
Taulukko 2. Puulajit, puuston pohjapinta-ala (ppa) ennen hakkuuta, tilavuudet (m<sup>3</sup>/ha) ennen ja jälkeen hakkuuta sekä puuston poistuma (m<sup>3</sup>/ha) puustokoealoittain.

Puusto-koeala	Turvekangas-tyyppi	Puulajit	Ppa 2010	Tilavuus 2010, m <sup>3</sup> /ha	Tilavuus 2012, m <sup>3</sup> /ha	Poistuma, m <sup>3</sup> /ha (%)
1	Mtkg I	Mänty, kuusi, koivu	38	320	143	177 (55)
2	Mtkg II	Mänty, kuusi, koivu	37	301	151	150 (50)
3	Ptkg II	Mänty	29	217	135	82 (38)
4	Vatkg	Mänty	23	165	109	56 (34)

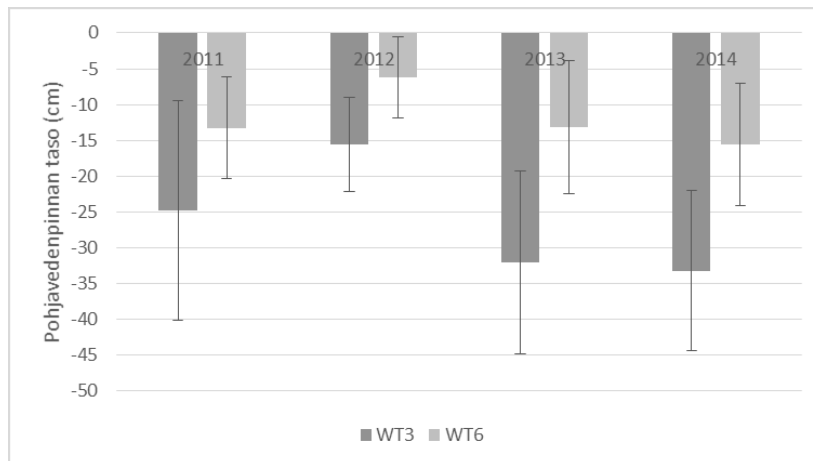
### 3.2 Pohjavedenpinnan taso

Jatkuva-aikaisesti mitatussa pohjavedenpinnan tasossa oli havaittavissa selvää vuosien välistä sekä koealojen välistä vaihtelua mittausjakson 2011–2014 aikana. Paksuturpeinen koeala 6 oli selvästi märempi kuin ohutturpeisempi koeala 3, ja pohjavedenpinnan tason vaihtelu mittausjakson aikana oli vähäisempää koealalla 6 kuin koealalla 3 (Kuva 4). Keskimääräinen vuotuinen pohjavedenpinnan etäisyys turpeen pinnasta vaihteli eri vuosina välillä 16–33 cm (WT3) ja 6–16 cm (WT6) (Kuva 5). Verrattuna vuoteen 2011, harvennushakkuun jälkeen pohjavedenpinnan taso nousi vuonna 2012 keskimäärin 9 cm ja 7 cm koealoilla 3 ja 6. Vuonna 2013, kunnostusojituksen jälkeen se laski taas vähintään vuoden

2011 tasolle tai sen alle. Lasku oli keskimäärin 16 cm (WT3) ja 7 cm (WT6) verrattuna vuoteen 2012. Vuonna 2014 keskimääräinen pohjavedenpinnan taso laski vielä edellisvuodesta 1 cm (WT3) ja 3 cm (WT6). Kunnostusojituksen sijoittuessa keskelle vuotta (elokuun loppu) verrattiin myös tammikuun ja elokuun välistä jaksoa vuosina 2011 ja 2012. Pohjavedenpinta nousi vuonna 2012 kyseisen jakson aikana 14 cm (WT3) ja 9 cm (WT6) verrattuna vuoteen 2011.



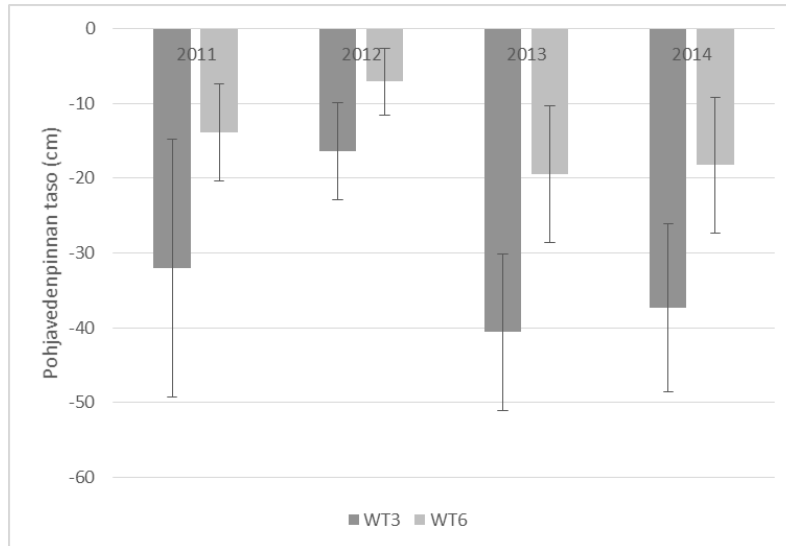
Kuva 4. Keskimääräinen pohjavedenpinnan taso ja keskihajonta vuosina 2011–2014 koealoilla 3 (WT3) ja 6 (WT6).



Kuva 5. Jatkuva-aikaisesti mitatun pohjavedenpinnan tason vuotuinen keskiarvo ja keskihajonta koealoilla 3 (WT3) ja 6 (WT6).

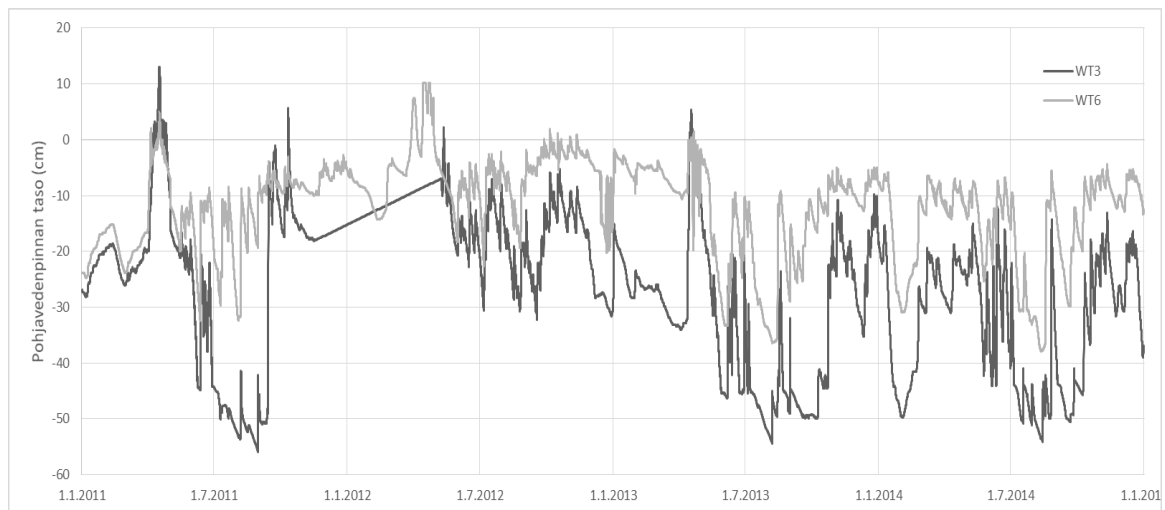
Kesäkauden aikana harvennushakkuun ja kunnostusojituksen vaikutukset pohjavedenpinnan tasossa näkyivät vielä selvemmin kuin koko vuotta tarkasteltaessa (Kuva 6). Kesäkauden keskimääräinen pohjavedenpinnan etäisyys turpeen pinnasta vaihteli vuosien välillä koealalla 3 välillä 16–41 cm ja koealalla 6 välillä 7–19 cm. Harvennushakkuun jälkeen vuonna 2012 kesäkauden keskimääräinen pohjavedenpinnan taso nousi 16 cm (WT3) ja 7 cm (WT6) vuoteen 2011 verrattuna. Vuonna 2013 kunnostusojituksen jälkeen

kesäkauden pohjavedenpinnan taso laski keskimäärin 25 cm (WT3) ja 12 cm (WT6) vuoteen 2012 verrattuna. Pohjavedenpinta säilyi molemmilla koealoilla suunnilleen vuoden 2013 tasolla myös vuonna 2014.



Kuva 6. Kesäkauden (toukokuu-lokakuu) keskimääräinen pohjavedenpinnan taso ja keskihajonta koealoilla 3 (WT3) ja 6 (WT6).

Vuosien sisäisessä vaihtelussa oli myös havaittavissa eroja vuosien sekä koealojen välillä (Kuva 7). Ennen harvennushakkuuta pohjavedenpinta oli vuoden aikana syvimmillään loppukesästä ja korkeimmillaan huhti-toukokuussa lumien sulamisaikaan. Talven ja kesän aikaiset pohjavedenpinnan tasot myös erosivat selvästi toisistaan erityisesti koealalla 3. Kuivemmat jaksot kestivät koealalla 3 pidempään kuin koealalla 6. Harvennushakkuun jälkeen vuoden aikainen vaihtelu väheni molemmilla koealoilla. Kuivemmat jaksot lyhenivät ja vedenpinta pysyi huomattavasti korkeammalla kuin ennen hakkuuta. Muutos oli suurempi erityisesti koealalla 3. Kunnostusojituksen jälkeen (2013) lumen sulaminen erottui vain ensimmäisenä keväänä. Myöhemmin yhtä selvää yksittäistä vedenpinnan nousua vuoden aikana ei enää esiintynyt. Kuivemmat jaksot lisääntyivät ja pidentyivät molemmilla koealoilla.



Kuva 7. Pohjavedenpinnan tason ajallinen vaihtelu koealoilla 3 ja 6 vuosien 2011–2014 aikana (jatkuva-aikainen mittausaineisto).

### 3.3 Turpeen ja ilman lämpötila

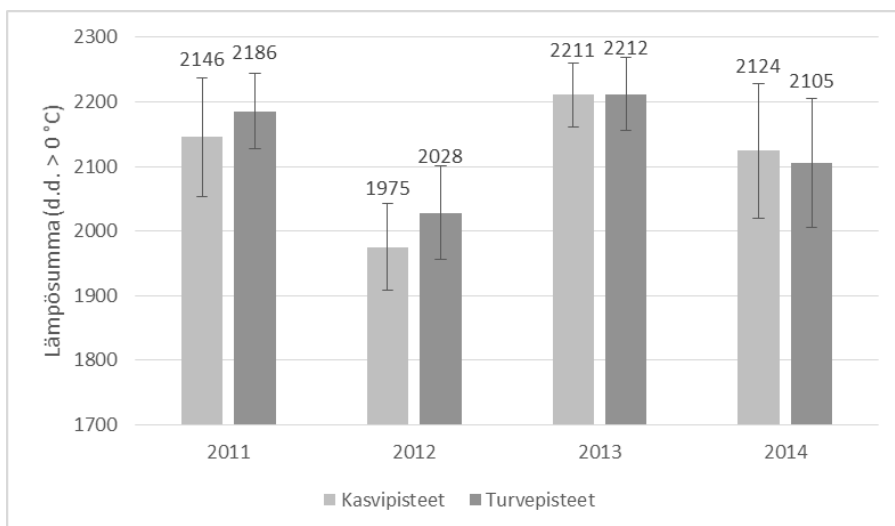
Ilman keskilämpötila ei juurikaan vaihdellut vuosien välillä lukuun ottamatta hieman kylmempää vuotta 2012 (Taulukko 3). Vuonna 2012 sekä kesäkauden että talvikauden keskilämpötilat olivat hieman matalammat verrattuna muihin vuosiin. Manuaalimittauksista ei voitu vastaavasti tarkastella lämpötilan kehitystä, sillä vuodelta 2012 oli liian vähän mittauksia. Ilmatieteen laitoksen tilastoissa vuosi 2012 oli selvästi tavanomaista sateisempi, mutta vuotuinen keskilämpötila oli vain hieman tavanomaista matalampi (Vuosi-tilastot 2011–2014). Vuodet 2011, 2013 ja 2014 olivat sen sijaan harvinaisen lämpimiä.

Taulukko 3. Ilman vuotuinen sekä kesä- ja talvikauden keskilämpötila jatkuva-aikaisista mittauksista koealojen 3 ja 7 keskiarvona. Kesäkausi käsittää toukokuun ja lokakuun välisen jakson. Talvikausi käsittää jaksot tammi-huhtikuu ja marras-joulukuu.

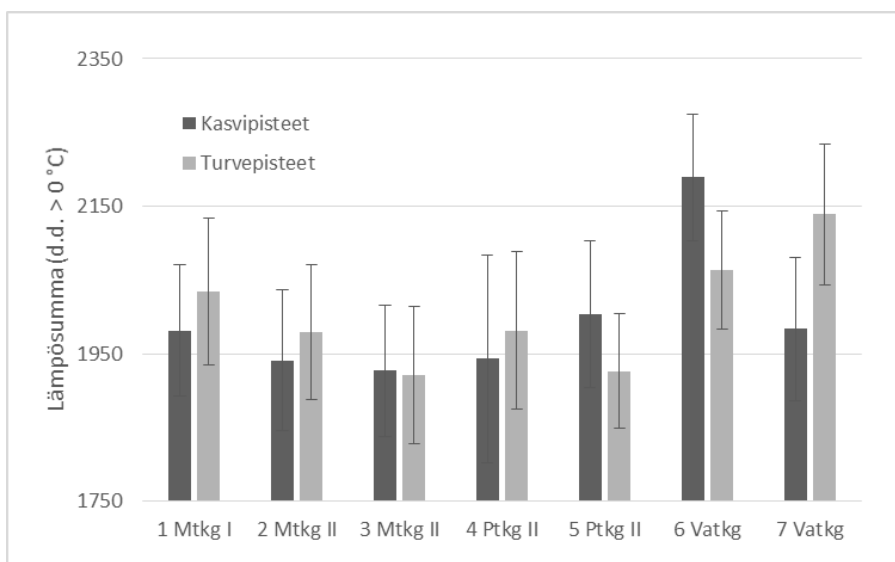
Vuosi	Ilman keskilämpötila, °C		
	Koko vuosi	Kesä	Talvi
2011	4,9	12,1	-2,5
2012	3,3	10,7	-4,3
2013	4,9	12,4	-2,6
2014	5,1	11,6	-1,5

Turpeesta 5 cm:n syvyydeltä mitatun lämpötilan perusteella laskettu vuotuinen lämpösumma (d.d. > 0 °C) vaihteli välillä 1868–2378 d.d. vuosina 2011–2014. Keskimäärin lämpösumma oli pienimmillään vuonna 2012 sekä kasvillisilla että kasvittomilla pisteillä

(Kuva 8). Tarkasteltaessa vuosia 2011–2013 peräkkäiset vuodet eroavat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan 95 %:n luottamusvälin perusteella. Lämpösumma oli karummilla koealoilla keskimäärin suurempi kuin rehevämmillä, mutta erot koealojen välillä eivät olleet suuria (Kuva 9). Tilastollisesti merkitsevä ero 95 %:n luottamusvälin perusteella oli ainoastaan koealan 6 kasvillisilla pisteillä sekä koealan 7 kasvittomilla pisteillä muihin koealoihin nähden.



Kuva 8. Keskimääräinen vuotuinen lämpösumma (T5, d.d. > 0 °C) kaikkien koealojen kasvillisille ja turvepisteille sekä 95 %:n luottamusväli (virhepalkki).



Kuva 9. Keskimääräinen vuotuinen lämpösumma (T5, d.d. > 0 °C) koealoittain vuosina 2011–2014 ja 95 %:n luottamusväli (virhepalkki).

Turpeen lämpötila oli toukokuun ja elokuun välillä korkeimmillaan. Talvella vuodenvaihteen tienoilla lämpötila laski nolleen tai sen alle. Keväisin turpeen lämpötila nousi 0 °C:n yläpuolelle huhti-toukokuussa. Koko mittausjakson aikana vuotuisessa turpeen keskilämpötilassa ei tapahtunut juurikaan muutosta (Taulukko 4). Koealojen tai pintojen välillä ei myöskään ollut juurikaan eroa (Taulukko 5). Karummilla koealoilla 6 ja 7 keskilämpötila oli hieman suurempi kuin rehevämmillä.

Taulukko 4. Turpeen lämpötilan vuotuinen kaikkien koealojen keskiarvo (ka) ja -hajonta (kh) kasvillisilla ja kasvittomilla (=turve) mittauspisteillä.

T5, °C Vuosi	Kasvi		Turve	
	Ka	Kh	Ka	Kh
2011	5,8	0,4	6,0	0,2
2012	5,2	0,3	5,4	0,3
2013	5,9	0,2	5,9	0,3
2014	5,6	0,5	5,5	0,4

Taulukko 5. Turpeen lämpötilan vuotuinen ja kesäkauden keskiarvo ja niiden keskihajonnat mittausjaksolle 2011–2014 koealoittain ja pinnoittain.

Turpeen lämpötila vuosille 2011–2014, °C					
Koeala	Pinta	Vuotuinen		Touko-lokakuu	
		Ka	Kh	Ka	Kh
1 Mtkg I	Turve	5,9	0,4	11,0	0,4
	Kasvi	5,7	0,3	10,3	0,3
2 Mtkg II	Turve	5,5	0,3	10,7	0,5
	Kasvi	5,5	0,3	10,6	0,5
3 Mtkg II	Turve	5,4	0,3	10,4	0,4
	Kasvi	5,4	0,3	10,5	0,4
4 Ptkg II	Turve	5,7	0,3	10,8	0,5
	Kasvi	5,4	0,5	10,5	0,7
5 Ptkg II	Turve	5,5	0,3	10,5	0,3
	Kasvi	5,7	0,3	10,9	0,4
6 Vatk	Turve	5,8	0,3	11,3	0,3
	Kasvi	6,3	0,3	11,9	0,2
7 Vatk	Turve	6,2	0,3	11,4	0,3
	Kasvi	5,5	0,4	10,8	0,3

### 3.4 Hiilidioksidivuo

#### 3.4.1 Hetkellinen hiilidioksidivuo

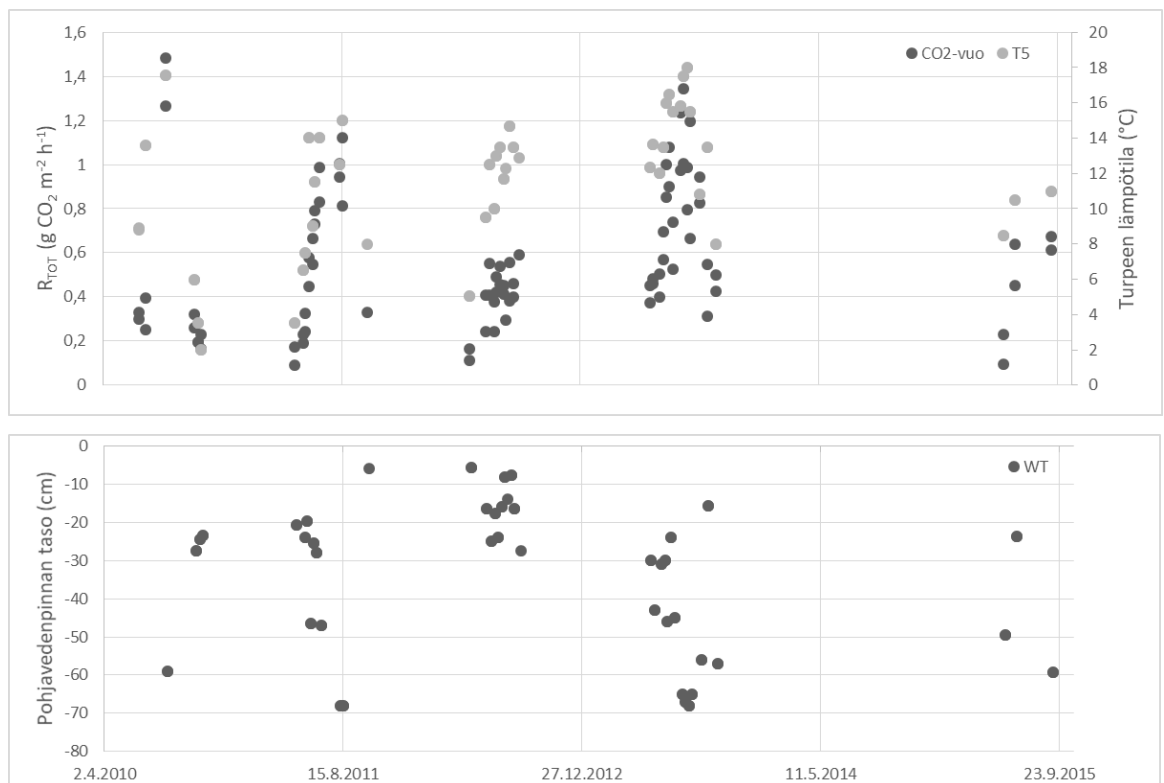
Hiilidioksidivuomittauksia kertyi koko mittausjakson aikana yhteensä 1552 kpl (Taulukko 6). Kasvillisilta mittauspisteiltä mittauksia kertyi kaikkiaan 89–90 kpl/koeala ja kasvittomilta 132–133 kpl/koeala.

Taulukko 6. Hiilidioksidimittausten lukumäärä koealoittain koko mittausjakson ajalta.

Hiilidioksidimittaukset ( $R_{TOT}$ , $R_{HET}$ )						
Koeala	2010	2011	2012	2013	2015	Yhteensä
1	35	47	55	70	15	222
2	34	47	55	70	15	221
3	35	47	55	70	15	222
4	35	47	54	70	15	221
5	35	48	55	70	14	222
6	35	47	55	70	15	222
7	35	47	55	70	15	222
Yhteensä	244	330	384	490	104	1552

Mitattu hetkellinen  $R_{HET}$  vaihteli välillä 0,01–1,28 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> koko mittausjaksolla. Hetkellinen  $R_{TOT}$  vaihteli välillä 0,06–1,48 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Suurin hetkellinen  $R_{TOT}$  1,48 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> mitattiin koealalla 3 ja suurin  $R_{HET}$  1,28 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> koealalla 1. Keskimääräinen  $R_{TOT}$  oli aina suurempi kuin  $R_{HET}$  lukuun ottamatta vuoden 2010 mittauksia koealalta 1, jolloin juurten katkaisu vielä vaikutti heterotrofisilla mittauspisteillä. Tuolloin koealan 1 keskimääräinen hetkellinen  $R_{HET}$  oli 0,45 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> ja  $R_{TOT}$  0,36 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Rehevämmillä koealoilla keskimääräinen hetkellinen hiilidioksidivuo oli yleensä suurempaa kuin karummilla, mutta koealan 7 (Vatkg) keskimääräinen  $R_{TOT}$  oli useana vuonna suurempi kuin osalla rehevistä koealoista (Liite 3). Harvennushakkuun vaikutus näkyi rehevillä koealoilla laskuna vuoden 2012 hetkellisissä vuoarvoissa (Liite 3). Karummilla koealoilla vastaavaa laskua ei ollut havaittavissa. Kunnostusojituksen jälkeen vuonna 2013 keskimääräinen hetkellinen hiilidioksidivuo nousi kaikilla koealoilla.

Hetkellisen hiilidioksidivuon vaihtelu seurasi sekä turpeen lämpötilan että pohjavedenpinnan tason vaihtelua (Kuva 10). Turpeen lämpötilan noustessa myös hiilidioksidivuo suureni. Vastaavasti pohjavedenpinnan tason laskiessa hiilidioksidivuo suureni. Vuonna 2012 harvennushakkuun jälkeen hiilidioksidivuo laski kuitenkin suhteessa edellisvuoteen enemmän kuin turpeen lämpötila. Sinä vuonna myös pohjavedenpinnan taso nousi merkittävästi edellisvuoteen verrattuna. Kunnostusojituksen jälkeen hetkellinen hiilidioksidivuo jälleen nousi ja pohjavedenpinnan taso laski.

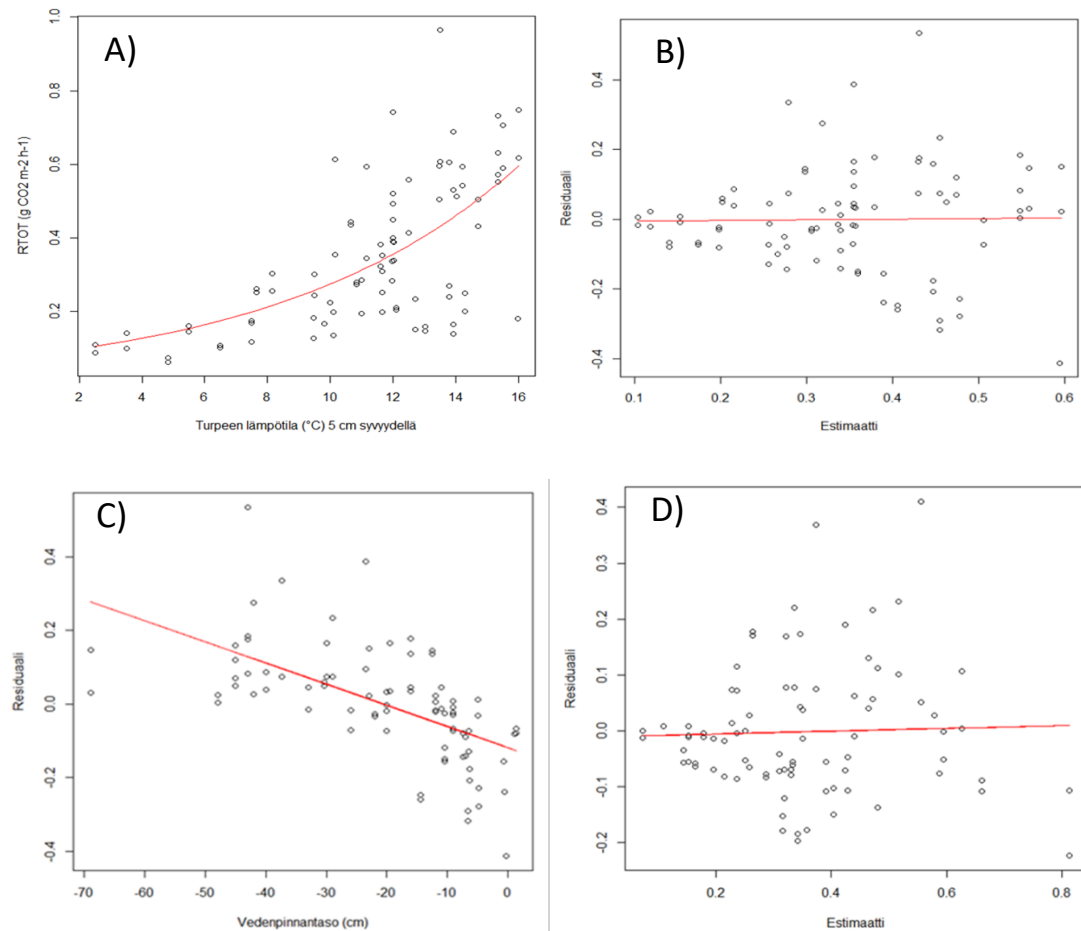


Kuva 10. Koelalta 3 mitattu hetkellinen  $R_{TOT}$  ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) sekä samoilta hetkiltä  $\text{CO}_2$ -vuon mallinnuksessa käytetyt jatkuvatoimisesti mitattu turpeen lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja manuaalisesti mitattu pohjavedenpinnan taso (cm), jonka aukkoja on täydennetty jatkuvatoimisilla mittauksilla.

Regressioanalyysissä havaittiin hiilidioksidivuon ja lämpötilan välillä eksponentiaalinen vuorosuhde sekä heterotrofisen että kokonaisrespiraation osalta (Kuva 11, A). Lämpötilamallin residuaaleja verrattaessa mallin estimaatteihin havainnoissa esiintyi heteroskedastisuutta eli suuremmilla lämpötila-arvoilla hiilidioksidivuossa esiintyi enemmän vaihtelua (Kuva 11, B). Pohjavedenpinnan tason ja lämpötilamallin residuaalien välillä oli havaittavissa selvä korrelaatio lähes kaikissa tapauksissa, mikä osoittaa, että myös pohjavedenpinnan tasolla oli vaikutusta hiilidioksidivuohon (Kuva 11, C). Korrelaatio oli



ennemmin epälineaarinen kuin lineaarinen. Korrelaatiota ei ollut kuitenkaan kaikilla koealoilla: karummilla koealoilla pohjavedenpinnan vaikutus hävisi. Kokonaisrespiraation osalta pohjavedenpinnan vaikutus hävisi koealoilla 5-7, mutta heterotrofisen respiraation osalta vaikutus hävisi vasta koealalla 7. Pohjavedenpinnan tason lisääminen malliin vähensi pisteparven heteroskedastisuutta niillä koealoilla, joilla pohjavedenpinnan tasolla oli vaikutusta hiilidioksidivuohon (Kuva 11, D). Niillä koealoilla, joilla pohjavedenpinnan taso ei näyttänyt vaikuttavan, käytettiin vain lämpötilamallia yhdistelmämallin sijaan (Taulukko 7).



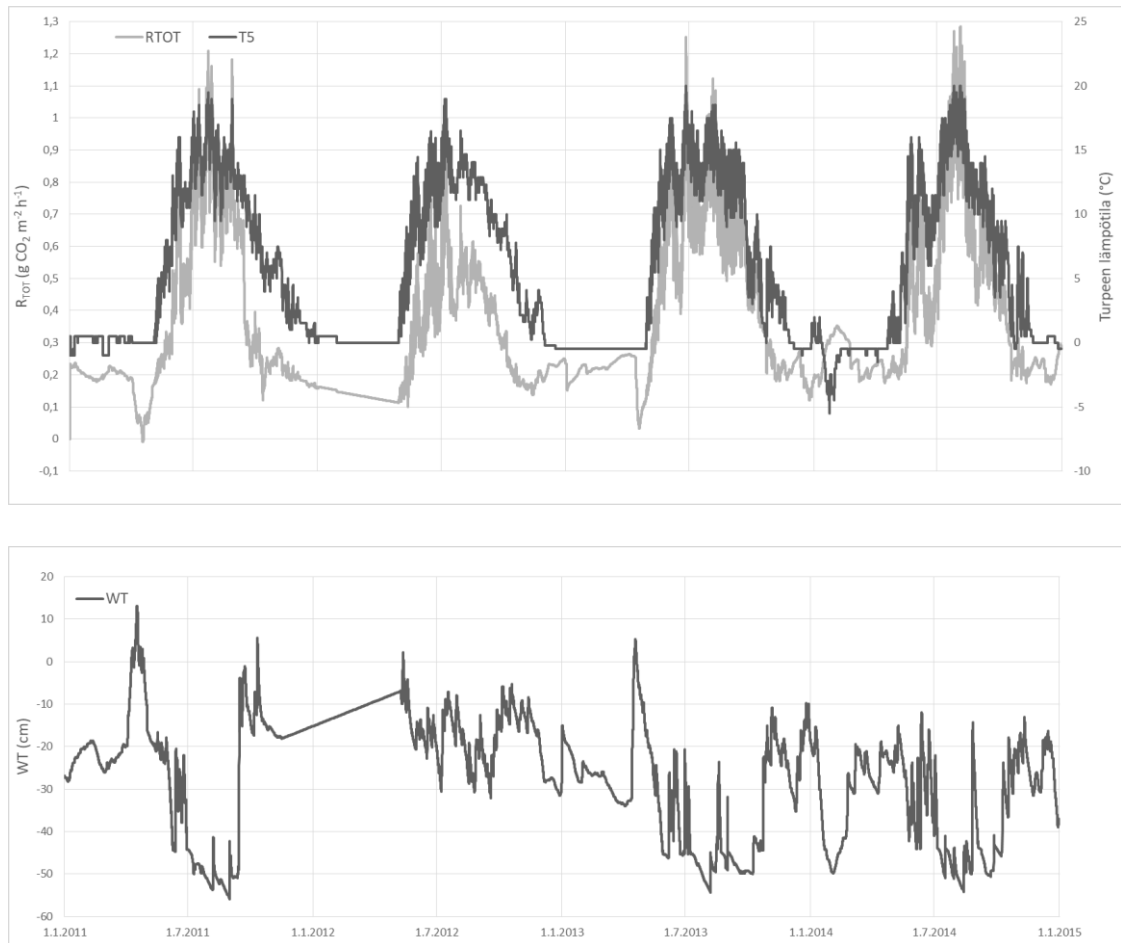
Kuva 11. A) Turpeen lämpötilan ja kokonaisrespiraation suhde sekä aineistoon sovitetun yhtälön ( $R = 0,07488 \times e^{0,1296 \times T^5}$ ) kuvaaja (koeala 1). B) Lämpötilamallin residuaalien ja estimaattien regressio. C) Lämpötilamallin ja pohjavedenpinnan tason regressio. D) Yhdistelmämallin ( $R = 0,0438743 \times e^{0,1310059 \times T^5} + (-0,0069303) \times WT$ ) residuaalien ja estimaattien regressio.

Taulukko 7. Hiilidioksidivuon ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) estimoinnissa käytetyt mallit pinnoittain ja koealoittain parametreineen (T5 = turpeen lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ), WT= pohjavedenpinnan taso (cm), n = mallissa käytettyjen havaintojen ( $\text{CO}_2$ ) lukumäärä, RSE = mallin jäännösvirhe).

T5-malli: $R = a \times e^{(b \times T5)}$								
T5+WT-malli: $R = a \times e^{(b \times T5)} + (c \times WT)$								
Koeala	Turvekangas- tyyppi	Pinta	a	b	c	RSE	n	Malli
1	Mtkg I	Kasvi	0,0438743	0,1310059	-0,0069303	0,1192	84	T5+WT
		Turve	0,017964	0,152794	-0,005831	0,1713	110	T5+WT
2	Mtkg II	Kasvi	0,07477	0,104113	-0,00517	0,1732	85	T5+WT
		Turve	0,1009259	0,0764172	-0,0020402	0,1114	125	T5+WT
3	Mtkg II	Kasvi	0,067965	0,133632	-0,005908	0,1855	84	T5+WT
		Turve	0,1128191	0,0658632	-0,0030162	0,1464	125	T5+WT
4	Ptkg II	Kasvi	0,1134356	0,0912408	-0,0018617	0,1009	82	T5+WT
		Turve	0,063254	0,0964133	-0,0028247	0,1029	124	T5+WT
5	Ptkg II	Kasvi	0,09758	0,100086		0,09091	89	T5
		Turve	0,0769073	0,0846976	-0,0014011	0,07465	122	T5+WT
6	Vatkg	Kasvi	0,082741	0,097507		0,09389	83	T5
		Turve	0,0321026	0,0926875	-0,0026082	0,07677	107	T5+WT
7	Vatkg	Kasvi	0,141092	0,086832		0,1211	87	T5
		Turve	0,08742	0,06631		0,09633	127	T5

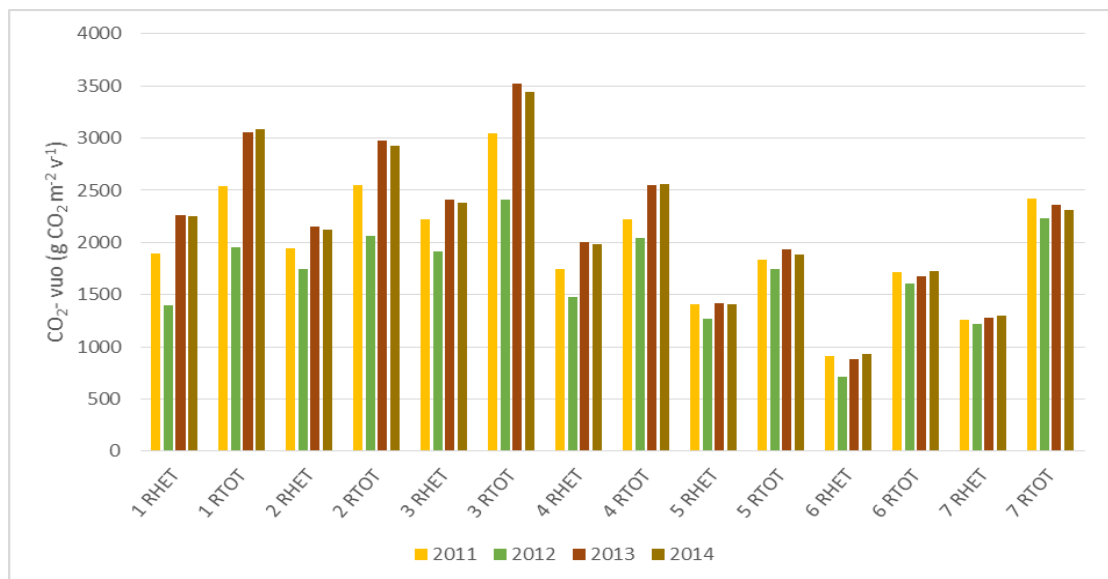
### 3.4.2 Kausittainen hiilidioksidivuon

Mallilla ennustettujen vuotuisten hiilidioksidivuon kehitys oli samankaltainen kuin hetkellisten vuoarvojen: rehevillä koealoilla vuotuinen vuo ja vuosien välinen vaihtelu olivat suuremmat kuin karummilla koealoilla.  $R_{\text{HET}}$  vaihteli vuosien 2011–2014 aikana välillä 711–2414  $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ v}^{-1}$  ja  $R_{\text{TOT}}$  välillä 1604–3519  $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ v}^{-1}$ .  $R_{\text{HET}}$  oli jokaisella koealalla pienempi kuin  $R_{\text{TOT}}$ , mutta heterotrofisen hengityksen osuus kokonaishengityksestä kasvoi rehevämmillä koealoilla. Mallilla ennustetun hiilidioksidivuon kehitystä verrattaessa mallin selittävien muuttujien (T5, WT) kehitykseen mittausjakson aikana havaittiin rehevillä koealoilla pohjavedenpinnan vaikuttavan enemmän hiilidioksidivuon muutoksiin kuin turpeen lämpötilan (Kuva 12). Vaikutus on selvimmin nähtävissä vuoden 2012 aikana sekä talvikaudella, jolloin turpeen lämpötilan ollessa lähes vakio hiilidioksidivuon muutokset seurasivat pohjavedenpinnan muutoksia tai saattoivat muuttua jopa päinvastaisesti turpeen lämpötilan muutoksiin verrattuna.



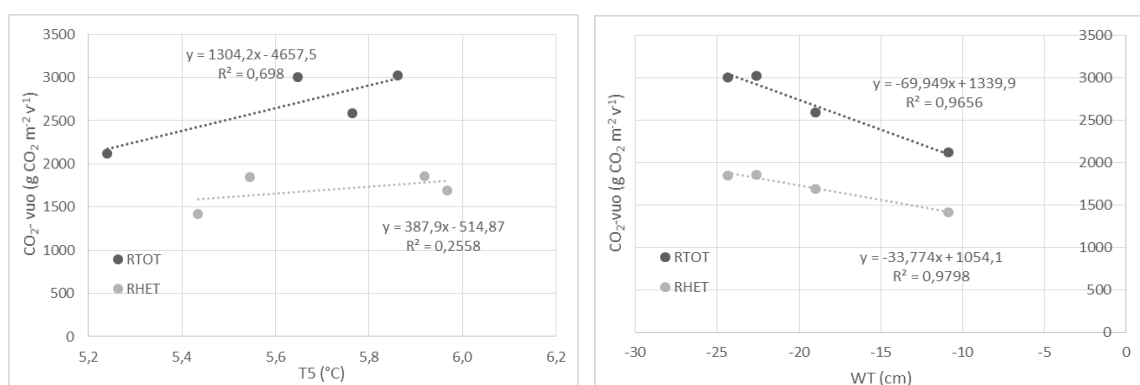
Kuva 12. Mallilla ennustettu kokonaisrespiraatio ( $R_{TOT}$ ) sekä jatkuva-aikaiset turpeen lämpötila (T5) ja pohjavedenpinnan taso (WT) koealalta 3 vuosina 2011–2014.

Ennustetut vuotuiset hiilidioksidivuot putosivat harvennushakkuun jälkeen vuonna 2012 edellisvuoden tasoon nähden jokaisella koealalla (Kuva 13). Samana vuonna pohjavedenpinta nousi runsaasti erityisesti kesäaikana verrattuna edellisvuoteen. Vuonna 2013, eli kunnostusojituksen jälkeisenä vuonna, vuon määrät kohosivat jälleen vuoden 2011 tasolle tai sen yli pohjavedenpinnan laskiessa. Toisena vuonna kunnostusojituksen jälkeen vuomäärät pysyivät suunnilleen samalla tasolla edelliseen vuoteen nähden jokaisella koealalla. Vuosien väliset muutokset hiilidioksidivuossa olivat hyvin selviä rehevämmillä koealoilla 1-3 sekä heterotrofisen että kokonaishengityksen osalta, kun taas karummilla koealoilla 5-7 muutokset olivat vähäisiä. Koealalla 4 vuoarvojen muutosten suuruus asetui edellisten välimaastoon. Rehevillä koealoilla 1-3 kokonaishengityksen muutos oli lähes kaksinkertainen heterotrofiseen hengitykseen nähden. Karuimmilla koealoilla 5-7 muutokset olivat sen sijaan lähes yhtä suuret. Koealalla 4 heterotrofisen hengityksen suhteen vuon muutokset olivat sen sijaan hieman suuremmat kuin kokonaishengityksen.



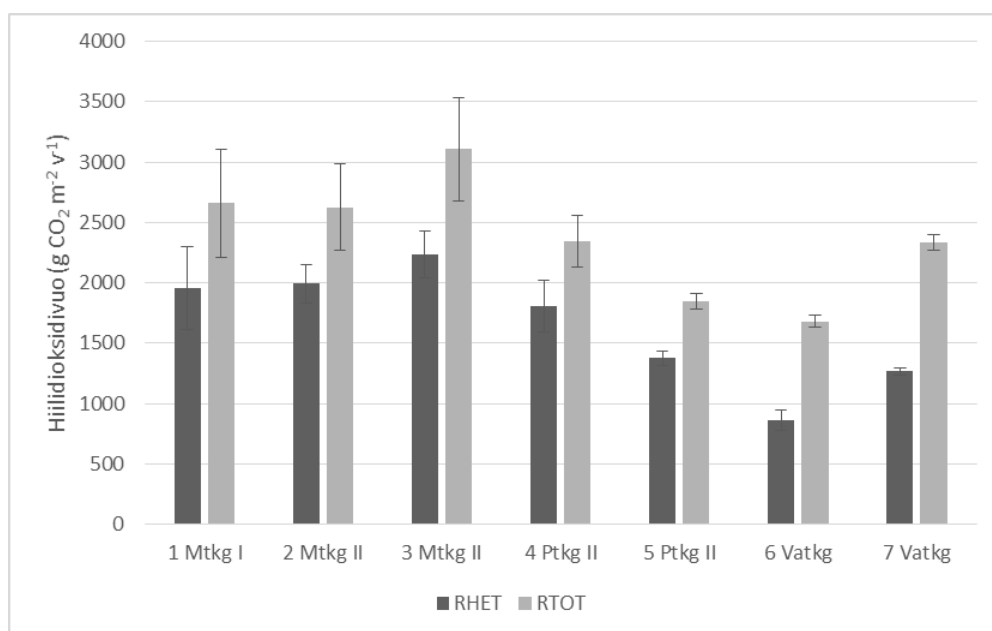
Kuva 13. Vuotuiset ennustetut heterotrofisen ( $R_{HET}$ ) ja kokonaisrespiraation ( $R_{TOT}$ ) hiilidioksidivuot koealoittain vuosina 2011–2014.

Pohjavedenpinnan tason muutokset selittivät ennustettujen vuotuisten hiilidioksidivoiden muutoksia paremmin kuin turpeen lämpötila verrattaessa vuotuisia voita mallin selittäviin muuttujiin ( $T_5$ ,  $WT$ ) kaikkien koealojen keskiarvona (Kuva 14). Turpeen lämpötila selitti kokonaisrespiraation ( $r^2 = 0,70$ ) muutoksia paremmin kuin heterotrofisen ( $r^2 = 0,26$ ). Pohjavedenpinnan muutosten vaikutus oli samansuuruinen sekä  $R_{HET}$ :n että  $R_{TOT}$ :n suhteen ( $r^2 = 0,97$ – $0,98$ ).



Kuva 14. Ennustetut vuotuiset hiilidioksidivuot ( $R_{TOT}$ ,  $R_{HET}$ ) mallin selittävien muuttujien ( $T_5$  = turpeen lämpötila,  $WT$  = pohjavedenpinnan taso) keskiarvojen suhteen. Lukuarvot ovat niiden koealojen keskiarvoja, joiden mallissa sekä  $T_5$  että  $WT$  olivat selittäjinä.

Ennustetut vuotuiset hiilidioksidivuot olivat suuremmat rehevämmillä koealoilla ja pienivät kohti karumpia koealoja (Kuva 15). Suurin vuotuinen vuo tuli koealalta 3 (Mtkg II) 3105 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> (R<sub>TOT</sub>) ja 2233 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> (R<sub>HET</sub>), ja pienin vuo puolestaan koealalta 6 (Ptkg II) 1680 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> (R<sub>TOT</sub>) ja 860 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> (R<sub>HET</sub>). Koealojen 1-4 keskimääräiset vuotuiset hiilidioksidivuot erosivat tilastollisesti merkitsevästi koealojen 5-7 vuoarvoista 95 %:n luottamusvälin perusteella lukuun ottamatta koealan 7 kokonaisrespiraation vuota. Kokonaishengityksen koealakohtainen vaihtelu oli rehevämmillä koealoilla suurempaa kuin heterotrofisen hengityksen vaihtelu. Karummilla koealoilla huomattavaa eroa vaihtelussa näiden kahden välillä ei juuri ollut.



Kuva 15. Koealoittainen keskiarvo ja keskivirheen avulla laskettu 95 %:n luottamusväli (virhepalkki) vuotuisille kokonaishengityksen (R<sub>TOT</sub>) ja heterotrofisen hengityksen (R<sub>HET</sub>) voille (vuodet 2011–2014).

Kesäkauden (toukokuu-lokakuu) aikainen mallilla ennustettu hiilidioksidivuo vaihteli välillä 511–1613 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> (R<sub>HET</sub>) ja 1161–2618 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> v<sup>-1</sup> (R<sub>TOT</sub>). Keskimääräiset kesäkauden hiilidioksidivuot olivat vuotuisista voista 68–77 % (R<sub>TOT</sub>) ja 65–71 % (R<sub>HET</sub>) koealasta riippuen. Pääsääntöisesti karummilla koealoilla osuus suureni. Kesäkauden voien vaihtelu oli samansuuntaista kuin vuotuisen vuonkin.

## 4 TULOSTEN TARKASTELU

### 4.1 Pohjavedenpinnan taso

Tämän tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli selvittää, aiheuttavatko harvennushakkuu ja kunnostusojitus muutoksia pohjavedenpinnan tasossa ja onko turvekangastyypin välillä eroja muutosten suhteen. Tulokset olivat hyvin selviä, ja tutkimuksen hypoteesit (1, 2, 4) pohjavedenpinnan tason muutosten osalta toteutuivat. Puuston määrän vähene-  
misen seurauksena pohjavedenpinnan taso nousi heti harvennushakkuun jälkeen, kuten on havaittu useissa aiemmissakin tutkimuksissa (Heikurainen 1967, Heikurainen ja Päi-  
vänen 1970, Päivänen ja Sarkkola 2000, Mäkiranta 2003). Pohjavedenpinnan tason vuo-  
tuinen keskiarvo nousi vuonna 2012 9 cm (WT3) ja 7 cm (WT6) verrattuna hakkuuta  
edeltävään vuoteen. Kesäkaudella, jolloin pohjavedenpinnan tasolla on suurempi merki-  
tys juuriston ja hapellisen hajotuksen kannalta, koealojen välinen ero muutoksen suuruu-  
dessa kasvoi: vedenpinnan nousut olivat 16 cm (WT3) ja 7 cm (WT6). Harvennuksen  
jälkeen kuivemmat jaksot vähenivät ja lyhenivät molemmilla koealoilla, mutta erityisesti  
koealalla 3.

Vuoden 2012 vedenpinnan tason tuloksiin sisältyy epävarmuutta, sillä kunnostusojituk-  
sen ajankohta sijoittui keskelle vuotta (elokuun loppu) vaikuttaen siten sen vuoden luke-  
miin. Tuloksia voitiin verrata tammikuun ja elokuun välisen jakson ajalta eri vuosina,  
jotta saataisiin parempi kuva harvennuksen vaikutuksesta: keskimääräinen vedenpinta  
nousi vuonna 2012 edellisvuodesta 14 cm (WT3) ja 9 cm (WT6). Mutta ero vedenpinnan  
nousun suuruudessa on kuitenkin luotettava vain koealalla 6, sillä WT3:n osalta täytyi  
interpoloida arvot usean kuukauden mittaiselle jaksolle vuosien 2011–2012 taitteessa  
puuttuvien mittausten takia (Kuva 7).

Tässä tutkimuksessa havaittu nousu kesäkauden keskimääräisessä vedenpinnantasossa on  
molemmilla koealoilla suurempi kuin aiemmissa tutkimuksissa (Heikurainen 1967, Hei-  
kurainen ja Päivänen 1970, Päivänen ja Sarkkola 2000, Mäkiranta 2003), joissa harven-  
nuksen aiheuttama vedenpinnan nousu on ollut kesäkaudella 0,2–7 cm. Kaikissa maini-  
tuissa tutkimuksissa lähtöpuuston tilavuus oli toisaalta pienempi, osassa jopa vain kol-  
masosa, verrattuna tähän tutkimukseen. Lisäksi on huomattava, että muissa tutkimuksissa

vedenpinnan tason muutos on määritelty pääsääntöisesti kontrollikoealan avulla, kun taas tässä tutkimuksessa vertailu tapahtuu edeltävän vuoden tasoon samalla koealalla.

Harvennushakkuun voimakkuudella oli tässäkin tutkimuksessa merkitys pohjavedenpinnan nousun suuruuteen, kuten aiemmissakin tutkimuksissa (Heikurainen ja Päivänen 1970, Päivänen ja Sarkkola 2000). Päiväsen ja Sarkkolan (2000) tutkimuksessa harvennushakkuu nosti pohjavedenpintaa eniten voimakkaampien hakkuiden (poistuma 15 ja 28 %) yhteydessä (enimmillään 7 cm). Samoin Heikuraisen ja Päiväsen (1970) tutkimuksessa (poistuma 60 %). Kotisuolla harvennuksen voimakkuudet koealoilla 3 ja 6 olivat 50 % ja 34 %. Ero keskimääräisen vuotuisen vedenpinnan nousussa koealojen välillä ei ollut suuri (2 cm), vaikka puuston poistuma WT3:lla oli huomattavasti suurempi (94 m<sup>3</sup>/ha enemmän). Sen sijaan kesäkauden pohjavedenpinnan keskitason muutoksen suuruus oli koealalla 3 yli kaksinkertainen verrattuna koealan 6 muutokseen. Toisaalta koealalla 6 pohjavedenpinta oli alkujaan paljon ylempänä kuin koealalla 3, millä voi olla myös vaikutusta siihen, kuinka paljon vedenpinnan taso voi vielä nousta harvennusvoimakkuudesta huolimatta (Hökkä ja Penttilä 1995).

Kunnostusojitus laski pohjavedenpinnan tasoa molemmilla koealoilla, mikä oli odotettua ja linjassa aiempien tutkimusten kanssa (Ahti ja Päivänen 1997, Päivänen ja Sarkkola 2000, Koivusalo ym. 2008). Ahti ja Päivänen (1997) havaitsivat kunnostusojituksen laskevan pohjavedenpinnan tasoa noin 5-10 cm kunnostuksen suoritustavasta riippuen. Heidän tutkimuksessaan pelkkä ojien perkaus, joka tässäkin tutkimuksessa oli menetelmänä, laski pohjavedenpintaa yleensä vähiten. Päivänen ja Sarkkola (2000) saivat samansuuruisia tuloksia vedenpinnan laskulle pelkällä ojien perkauksella. Ojien perkauksen vaikutus oli Kotisuolla kuitenkin suurempi: keskimääräinen pohjavedenpinta laski 16 cm (WT3) ja 7 cm (WT6) seuraavana vuonna kunnostuksen jälkeen. Kesäkaudella kunnostusojituksen vaikutus oli vieläkin voimakkaampi: vedenpinta laski 25 cm (WT3) ja 12 cm (WT6). Se ei kuitenkaan ole yhtä merkittävä lasku kuin Koivusalon ym. (2008) tutkimuksessa havaittu 30–40 cm ohutturpeisilla kohteilla Pohjois-Suomessa.

Kunnostusojitus kompensoi kokonaan harvennushakkuun aiheuttaman pohjavedenpinnan nousun, kuten myös Päiväsen ja Sarkkolan (2000) tutkimuksessa. Kotisuolla kunnos-

tusojitus laski pohjavedenpinnan hakkuuta edeltänyttä tasoa syvemmälle, erityisesti kesäkaudella. Kunnostusojituksen jälkeen kuivemmat jaksot pohjavedenpinnan tason suhteen lisääntyivät ja pitenivät molemmilla koealoilla verrattuna kontrollivuoteen 2011.

Kunnostusojitus laski sekä keskimääräistä vuotuista että kesäkauden aikaista pohjavedenpinnan tasoa ohutturpeisemmalla koealalla 3 kaksinkertaisesti verrattuna paksuturpeeseen koealaan 6. Tämä havainto tukee Koivusalon ym. (2008) tuloksia siitä, että ojien perkuu laskee pohjavedenpintaa erityisesti ohutturpeisilla turvemailla. Toisaalta Koivusalon ym. (2008) tutkimuksessa ei havaittu paksuturpeisilla kohteilla kunnostusojituksella olevan selvää vaikutusta pohjavedenpinnan tasoon. Kotisuolla vedenpinnan taso kuitenkin reagoi selvästi myös paksuturpeisella kohteella. Koivusalon ym. (2008) tutkimuksessa ei kuitenkaan tehty harvennushakkuuta ennen kunnostusojitusta, mikä on huomioitava tuloksia vertailtaessa. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että paksuturpeisilla kohteilla kunnostusojituksella on vaikeampi parantaa suon kuivatustilaa kuin ohutturpeisilla kohteilla.

Koska kokeessa ei ollut kontrollikoealaa, harvennuksen ja kunnostusojituksen vaikutusten suuruuden arviointi oli hankalaa. Vuosi 2012 oli hyvin sateinen, mikä saattoi tehostaa harvennushakkuun vaikutusta ja nostaa vedenpintaa korkeammalle kuin mitä se normaalinä vuonna olisi ollut harvennuksen vaikutuksesta. Hyvä esimerkki tästä on Mäkirannan (2003) tutkimuksen tulokset pohjavedenpinnan tason suhteen: jos tuloksissa olisi verrattu vedenpinnan muutoksia eri vuosien välillä vain hakkuukoealalla, harvennushakkuu olisi vaikuttanut jopa hieman laskevan vedenpinnan tasoa. Kuitenkin verrattaessa kontrollikoealaa voitiin todeta vedenpinnan nousseen hakkuun seurauksena (Mäkiranta 2003).

## **4.2 Turpeen lämpötila**

Tutkimuksen tulokset turpeen lämpötilan muutosten suhteen (Taulukko 4) olivat täysin päinvastaiset kolmannen hypoteesin olettamuksen kanssa turpeen pintakerrosten lämpötilan noususta harvennushakkuun seurauksena. Hakkuun jälkeisenä vuonna turpeen keskilämpötila laski (keskimäärin 0,6 °C) edellisvuodesta kaikilla koealoilla. Mäkirannan (2003) tutkimuksessa harvennushakkuulla ei ollut vaikutusta turpeen keskilämpötilaan. Kuitenkin avohakkuiden on aiemmin havaittu nostavan turpeen pintakerrosten lämpötilaa (Huttunen ym. 2003, Mäkiranta ym. 2010). Kesäkauden aikainen turpeen keskilämpötila



oli Mäkirannan ym. (2010) tutkimuksessa päätehakkuun jälkeen kolmena vuonna 1,3–1,5 °C korkeampi kuin hakkuuta edeltävänä vuonna.

Turpeen lämpötila sekä lämpösumma mukailivat pitkälti ilman lämpötilan muutoksia. Vuosi 2012 oli lähes koko maassa tavanomaista sateisempi sekä hieman viileämpi (Vuositilastot 2011–2014), mikä voi selittää ilman keskilämpötilan notkahduksen lisäksi myös turpeen lämpötilan laskun samana vuonna, vaikka puuston harvennuksen olisi voinut olettaa nostavan turpeen pintakerrosten lämpötilaa. Muut mittausjakson vuodet olivat lisäksi harvinaisen lämpimiä suuressa osassa maata (Vuositilastot 2011–2014), mikä myös selittää eroa vuoteen 2012. Kuitenkin sekä turpeen keskilämpötila että lämpösumma pienenevät vuonna 2014 vuoden 2013 lukemista, vaikka ilman keskilämpötila oli tuolloin edellisvuotta korkeampi. Tästä voisi tehdä varovaisia päätelmiä sen suhteen, että kunnostusojitus olisi ehkä vaikuttanut turpeen lämpötilan laskuun. Varmuutta asiasta ei kuitenkaan ole.

Tutkimuksen neljäs hypoteesi kasvupaikkojen välisistä eroista turpeen lämpötilan muutosten suhteen ei toteutunut. Sekä lämpösumma (Kuva 9) että turpeen keskilämpötila (Taulukko 5) olivat karummilla koealoilla hieman suuremmat kuin rehevämmillä, mitä voi selittää vähäisempi puuston määrä, joka päästää enemmän auringon valoa maanpinnalle asti ja mahdollistaa lumen sulamisen nopeammin. Vuosien välinen vaihtelu oli kuitenkin samansuuruista sekä rehevillä että karuilla koealoilla. Yllättävää oli se, että koealalla 7 kasvillisten mittauspisteiden koko mittausjakson keskimääräinen lämpösumma oli paljon pienempi kuin kasvittomien (Kuva 9). Samoin turpeen keskilämpötila mittausjaksolle oli 0,7 °C matalampi koealan 7 kasvillisilla kuin kasvittomilla pisteillä (Taulukko 5). Muilla koealoilla erot eivät olleet yhtä suuret pintojen välillä tai käyttäytyivät päinvastoin. Syy tähän ei kuitenkaan selvinnyt.

Tulokset turpeen lämpötilan suhteen olivat epävarmoja, ja ilman kontrollialuetta on vaikea arvioida sääolosuhteiden ja toimenpiteiden vaikutusten suuruutta. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että vuosittaisilla sääolosuhteilla on ollut suurempi vaikutus turpeen lämpötilan muutoksiin kuin harvennushakkuulla tai kunnostusojituksella.

### 4.3 Hiilidioksidivuoto

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia, kuinka harvennushakkuu ja kunnostusojitus vaikuttavat turpeen pinnasta vapautuvaan hiilidioksidivuohon ja mitkä ovat turpeen lämpötilan sekä pohjavedenpinnan tason roolit mahdollisissa muutoksissa. Hiilidioksidivuota mitattiin kokonaisrespiraationa sekä heterotrofisena respiraationa. Heterotrofisen respiraatio käsitti turpeen ja uuden karikkeen hajotuksesta aiheutuvan hiilidioksidivuon, ja se mitattiin kasvittomilta pinnoilta. Kasvien maanpinnasta poistamisen lisäksi elävät juuret katkottiin syvillä metallikauluksilla. Kokonaisrespiraatio käsitti sekä hajottajien heterotrofisen että kasvien autotrofisen respiraation. Kokonaisrespiraation mittauspisteet olivat käytännössä häiriintymättömät.

Heterotrofisen respiraation mittaukseen liittyy enemmän epävarmuustekijöitä kuin kokonaisrespiraation mittaukseen maaperän häiriintymisen takia. Mitatun hetkellisen heterotrofisen respiraation määriin on voinut erityisesti vuonna 2010 vaikuttaa juurten katkominen. Juurten katkominen lisää nopeasti hajotettavan karikkeen määrää turpeessa ja voitaisiin lisätä myös hiilidioksidivuota (Minkkinen ym. 2007b). Tämä vaikutus on kuitenkin pääosin ohi vuonna 2011, joka oli toinen kontrollivuosi ennen toimenpiteitä. Toisaalta kasvillisuuden poisto voi aiheuttaa normaalia poikkeavat olosuhteet myös pidemmäksi aikaa vaikuttaessaan turpeen lämpötilaan, kosteuteen ja hapellisuuteen (Minkkinen ym. 2007b). Juurten katkominen 20–30 cm syvillä kauluksilla lopettaa transpiraation ja eristää mittauspisteen pintaturvekerroksen ympäröivästä turpeesta ja vaikuttaa sitäkin kautta turpeen kosteusoloihin (Minkkinen ym. 2007b).

Turpeen pinnasta mitattujen hetkellisten hiilidioksidivoiden sekä estimoitujen vuotuisten voiden vaihteluvälit ovat linjassa aiempien ojitetuilla soilla tehtyjen hiilidioksidimittausten kanssa sekä heterotrofisen (Minkkinen ym. 2007b, Ojanen ym. 2010) että kokonaisrespiraation (Ojanen ym. 2010) osalta. Hiilidioksidivuon mittausten menetelmät olivat Ojanen ym. (2010) sekä Minkkinen ym. (2007b) tutkimuksissa yhtenevät tämän tutkimuksen kanssa, mutta  $R_{HET}$  ei sisältänyt uutta kariketta, jonka tulo estettiin tai poistettiin mittauskauluksista. Kummassakaan aiemmassa tutkimuksessa ei tehty myöskään minkäänlaista metsänkäsittelyä mittaajakauden aikana. Tässä tutkimuksessa ennustettujen hiilidioksidivoiden suuruuteen aiheuttaa hieman harhaisuutta se, että jatkuva-aikaisen vedenpinnan

tason mittauksia oli ainoastaan kahdelta koealalta ja niillä mallinnettiin muidenkin koealojen vuota. Lisäksi hetkellistä hiilidioksidivuota, jolla mallinnettiin vuotuistakin vuota, mitattiin ainoastaan sulanmaan aikaan ja päiväsaikaan.

Rehevillä koealoilla ilmennyt selvä vuosien välinen vaihtelu sekä keskimääräisessä hetkellisessä (Liite 3) että ennustetussa vuotuisessa vuossa (Kuva 13) viittaa siihen, että harvennushakkuulla ja kunnostusojituksella on ollut merkittävä vaikutus hiilidioksidivuohon. Toisaalta on myös hyvin nähtävissä toimenpiteiden vähäinen merkitys karumilla ja paksuturpeisemmilla kasvupaikoilla. Ennen tätä tutkimusta harvennushakkuun vaikutuksia metsäojitetun suon hiilidioksidivuohon on tutkinut tietävästi ainoastaan Mäkiranta (2003). Tämän tutkimuksen tulokset eroavat vaikutuksen suuruudessa Mäkiran (2003) tuloksista, jonka tutkimuksessa harvennushakkuu vähensi vain vähän maa-hengitystä, jossa oli mukana heterotrofinen sekä juurten hengitys. Ero kontrollikoealaan ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä. Vastaavissa kivennäismailla tehdyissä tutkimuksissa on vielä enemmän eroja harvennuksen vaikutuksesta maaperän hiilidioksidivuohon kuin turvemailla (Londo ym. 1999, Tang ym. 2005, Sullivan ym. 2008). Aiempien tutkimusten havaintoja on, että harvennushakkuu on vähentänyt maaperän hiilidioksidivuota erityisesti autotrofisen hengityksen vähentyessä poistettujen puiden juurten kuoltua (Sullivanin ym. 2008), tai hakkuun vaikutus hiilidioksidivuohon ei ole ollut havaittavissa (Tang ym. 2005). Toisaalta hakkuut ovat saattaneet lisätä hiilidioksidivuota jopa lähes 20 % (Londo ym. 1999).

Hetkellinen hiilidioksidivuoto korreloi positiivisesti turpeen lämpötilan kanssa kaikilla koealoilla ja pinnoilla (Kuva 11, A), mikä oli oletettavaakin (Minkkinen ym. 2007b). On todettu, että vanhoilla ojitusalueilla turpeen lämpötila on merkittävin turpeen hiilidioksidivuota säätelevä tekijä, eivätkä pohjavedenpinnan tason vaihtelut enää suuresti vaikuta suon hiilidioksidivuohon (Minkkinen ym. 2007a). Turpeen lämpötila ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa selittänyt yksinään hiilidioksidivuota, vaan myös pohjavedenpinnan tasolla oli vaikutusta. Havaittiin, että metsänhoitotoimenpiteiden yhteydessä pohjavedenpinnan tason merkitys hiilidioksidivuota säätelevänä tekijänä korostui enemmän kuin turpeen pintakerrosten lämpötilan merkitys (Kuva 10). Turpeen keskilämpötila ei vaihdellut merkittävästi mittausjakson aikana, eikä vaihtelua voinut suoraan liittää harvennushakkuun tai kunnostusojituksen aikaansaamaksi. Pohjavedenpinnan taso sen sijaan reagoi

selvästi toimenpiteisiin, ja hetkellinen hiilidioksidivuoto muuttui samassa suhteessa pohjavedenpinnan kanssa. Sama oli nähtävissä verrattaessa ennustettujen vuotuisten voiden keskiarvoja yhdistelmämallissa käytettyjen T5:n ja WT:n keskiarvoihin (Kuva 14). WT:n muutokset selittivät vuosien välistä vaihtelua turpeen lämpötilaa paremmin. Nämä havainnot todensivat kaksi ensimmäistä hypoteesia pohjavedenpinnan tason vaikutuksesta hiilidioksidivuohon.

Lämpötilamallin residuaaleja verrattaessa pohjavedenpinnan tason kanssa havaittiin korrelaation olevan lievästi epälineaarinen lineaarisen sijaan (Kuva 11, C). Pohjavedenpinnan laskiessa hiilidioksidivuoto ei välttämättä enää suurentunut, vaan saattoi jopa pienentyä. Tämä viittaa siihen, että hyvin syvällä oleva pohjavedenpinnan taso voi aiheuttaa kuivuutta, joka rajoittaa hajotusta (Laiho ym. 2004) ja ehkä myös autotrofista hengitystä. Myös Mäkiranta ym. (2009) havaitsivat kuivuuden rajoittavan hajotusta. Laiho ym. (2004) havaitsivat, että ojitetuilla soilla pohjavedenpinnan tason ollessa 40 cm syvyydessä maaperän pintakerroksessa voi esiintyä voimakasta kuivuutta. Vastaavasti Silvola ym. (1996) havaitsivat, että pohjavedenpinnan tason ollessa yli 30–40 cm syvyydessä hiilidioksidivuoto alkoi yleensä laskea.

Hiilidioksidivuon paikallinen vaihtelu vastasi myös aiemmin havaittua. Hiilidioksidivuon on yleisesti havaittu pienenevän rehevämmlä turvekangastyypeiltä karummille kasvupaikoille (Martikainen ym. 1995, Silvola ym. 1996, Minkkinen ym. 2007b, Ojanen ym. 2010). Tässä tutkimuksessa koealojen välinen vaihtelu ennustetuissa vuotuisissa vuoroissa (Kuva 15) vastasi hyvin Ojasen ym. (2010) tutkimuksessa esitettyä suuntausta turvekangastyyppien välisistä eroista. Erot keskimääräisissä vuotuisissa hiilidioksidivoissa rehevien ja karujen turvekangastyyppien välillä olivat pääsääntöisesti tilastollisesti merkitseviä 95 %:n luottamusvälin perusteella (Kuva 15). Tutkimuksen neljäs hypoteesi näin ollen toteutui hiilidioksidivuon osalta vuomäärien ja niiden muutosten suuruuden ollessa pitkälti yhteydessä turvekangastyyppin ravinteisuustasoon.

Erisuuruiset muutokset vuotuisessa heterotrofisessa ja kokonaishengityksessä rehevillä koealoilla antavat ymmärtää, että toimenpiteet olisivat rehevillä koealoilla vaikuttaneet sekä heterotrofisen hengityksen että autotrofisen hengityksen määrään (Kuva 13). Harvennushakkuun jälkeinen vedenpinnan nousu on rajoittanut hajotusta sekä juurten kasvua. Mäkirannan (2003) tutkimuksessa harvennushakkuun vaikutus juurten hengitykseen

jäi vähäiseksi suuresta (noin 50 %) puuston poistosta huolimatta. Hapellisen kerroksen lisääntyminen kunnostusojituksen jälkeen on kiihdyttänyt hajotusta, mutta todennäköisesti lisännyt myös juurten tuotantoa (Finér ja Laine 1998). Karuilla koealoilla sekä heterotrofisen että kokonaishengityksen muutokset olivat samansuuruisia, mikä viittaisi siihen, että toimenpiteet olisivat vaikuttaneet lähinnä heterotrofiseen hengitykseen eli hajotukseen autotrofisen hengityksen sijaan.

Vuotuisen ennustetun heterotrofisen hengityksen osuus oli keskimäärin 68 % kokonaishengityksestä (Kuva 15). Heterotrofisen respiraation ( $R_{HET}$ ) osuus suhteessa kokonaishengitykseen ( $R_{TOT}$ ) oli suurempi rehevämmillä koealoilla (yli 70 %) kuin karummilla (hieman yli 50 %). Tämä saattaisi olla seurausta siitä, että korkea pohjavedenpinta rajoittaa hajotusta enemmän karuilla koealoilla. On myös mahdollista, että juuria on kasvanut takaisin mittauskaulusten alle, tai kaikkia juuria ei ole saatu alun perinkään katkaistua liian matalien kaulusten takia. Tällöin erityisesti rehevillä koealoilla, joilla puuston määrä on suurempi kuin karuilla, heterotrofisissa mittauksissa olisi mukana myös enemmän juuriston autotrofista hengitystä. Juuriston mahdollista palautumista ei kuitenkaan tutkittu.

Harvennushakkuun ja kunnostusojituksen vaikutuksen suuruuden tarkastelua haittaa se, ettei tutkimuksessa ollut mukana vastaavanlaista ojitusaluetta, jolla ei olisi tehty lainkaan toimenpiteitä eli niin sanottua kontrollialuetta. Tästä syystä on vaikea arvioida, kuinka suuri osuus ympäristötekijöiden ja hiilidioksidivuon vaihtelusta johtui vuosittaisten sääolosuhteiden vaihtelusta. Tulosten ollessa kuitenkin hyvin selvät pohjavedenpinnan tason ja hiilidioksidivuon muutosten suhteen, voidaan todeta harvennushakkuun ja kunnostusojituksen vaikuttaneen maanpinnasta vapautuvan hiilidioksidivuon määrään.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Harvennushakkuu ja kunnostusojitus yhdessä toteutettuna voivat tämän tutkimuksen perusteella lisätä merkittävästi hengityksestä aiheutuvaa hiilidioksidivuota metsäojitetulla suolla erityisesti rehevillä kasvupaikoilla. Karummilla kasvupaikoilla toimenpiteiden vaikutus näyttää sen sijaan jäävän vähäiseksi. Harvennushakkuu yksinään voi kuitenkin vähentää hiilidioksidivuota suon pinnasta nostaessaan pohjavedenpinnan tasoa.

Harvennushakkuu ja kunnostusojitus vaikuttivat selvästi pohjavedenpinnan tasoon. Harvennushakkuu nosti pohjavedenpintaa ja kunnostusojitus laski sitä. Muutokset olivat suuremmat rehevämmillä ja ohutturpeisemmalla kasvupaikalla. Turpeen pintakerrosten lämpötilan suhteen toimenpiteiden vaikutus jäi vähäiseksi ja epävarmaksi. Pohjavedenpinnan tason muutokset selittivät hiilidioksidivuon muutoksia rehevämmillä kasvupaikoilla paremmin kuin turpeen lämpötila. Karummilla kasvupaikoilla pohjavedenpinnan muutokset eivät enää selittäneet hiilidioksidivuon muutoksia. Hyvin syvällä oleva pohjavedenpinnan taso voi kuitenkin rajoittaa hiilidioksidivuota aiheuttaessaan kuivuutta. Voidaan todeta, että harvennushakkuun ja kunnostusojituksen yhteydessä pohjavedenpinnan tason muutoksilla on suurempi merkitys suon pinnasta vapautuvan hiilidioksidin säätelijänä kuin turpeen lämpötilan.

Tutkimuksen tuloksia ei kuitenkaan voida suoraan yleistää koskemaan kaikkia metsäojitettuja soita, sillä harvennushakuun ja kunnostusojituksen vaikutusten turvekankaiden ympäristötekijöihin on havaittu vaihtelevan paljonkin. Tutkimus kuitenkin osoittaa, että metsäojitettujen soiden harvennushakkuun ja kunnostusojituksen vaikutukset soiden hiilidioksidivaihtoon on otettava huomioon myös suometsien käyttöä suunniteltaessa. Lisää tutkimusta toimenpiteiden vaikutuksesta hiilidioksidivuohon tarvitaan sekä pidemmältä ajalta että koko suoekosysteemin tasolla.

## KIITOKSET

Haluan kiittää ohjaajaani yliopistonlehtori Kari Minkkistä mielenkiintoisesta aiheesta, mainiosta ohjauksesta sekä kärsivällisestä rautalankojen vääntämisestä. Kiitokset myös muille minua tutkielmani tekemisessä avustaneille sekä kenttämittaukset tehneille metsäylioppilaille.

Erityisen suuret kiitokset haluan osoittaa miehelleni Petterille ja muulle perheelleni, jotka ovat minua väsymättä kannustaneet sekä auttaneet muun muassa ottamalla lapsenvahtivuoroja.

## LÄHTEET

- Ahti, E. & Päivänen, J. 1997. Response of stand growth and water table level to maintenance of ditch networks within forest drainage areas. Julkaisussa: Trettin, C. C., Jurgensen, M. F., Grigal, D. F., Gale, M. R., Jeglum, J. R. (ed.) Northern forested wetlands: Ecology and Management. CRC Press, Inc. Florida. s. 449-457.
- Alm, J., Shurpali, N. J., Tuittila, E., Laurila, T., Maljanen, M., Saarnio, S. & Minkkinen, K. 2007. Methods for determining emission factors for the use of peat and peatlands - flux measurements and modelling. *Boreal Environment Research* 12: 85-100.
- Crow, S. E. & Wieder, R. K. 2005. Sources of CO<sub>2</sub> emission from a northern peatland: Root respiration, exudation, and decomposition. *Ecology* 86(7): 1825-1834. <https://doi.org/10.1890/04-1575>
- Finér, L. & Laine, J. 1998. Root dynamics at drained peatland sites of different fertility in southern Finland. *Plant and Soil* 201(1): 27-36. <https://doi.org/10.1023/A:100437382>
- Fraser, A. I. & Gardiner, J. 1967. Rooting and stability in Sitka spruce. Her Majesty's Stationery Office, London. *Forestry Commission Bulletin* 40:1-23. Saatavissa: [https://www.forestry.gov.uk/pdf/FCBU040.pdf/\\$FILE/FCBU040.pdf](https://www.forestry.gov.uk/pdf/FCBU040.pdf/$FILE/FCBU040.pdf)
- Heikurainen, L. 1967. Influence of cuttings on the water economy of drained peatlands. *Acta Forestalia Fennica* 82(2). 45 s. <https://doi.org/10.14214/aff.7175>
- Heikurainen, L. & Päivänen, J. 1970. The effect of thinning, clear cutting, and fertilization on the hydrology of peatland drained for forestry. *Acta Forestalia Fennica* 104: 1-23.
- Hogg, E. H., Lieffers, V. J. & Wein, R. W. 1992. Potential carbon losses from peat profiles: Effects of temperature, drought cycles, and fire. *Ecological Applications* 2(3): 298-306.



- Huttunen, J. T., Nykänen, H., Martikainen, P. J. & Nieminen, M. 2003. Fluxes of nitrous oxide and methane from drained peatlands following forest clear-felling in southern Finland. *Plant and Soil* 255(2): 457–462. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1026035427891>
- Hökkä, H. ja Penttilä, T. 1995. Harvennushakkuun vaikutus pohjavedenpinnan syvyyteen ojitusalueilla Pohjois-Suomessa. *Suo* 46(1): 9–19.
- Hökkä, H., Kaunisto, S., Korhonen, K. T., Päivänen, J., Reinikainen, A. & Tomppo, E. 2002. Suomen suometsät 1951–1994. *Metsätieteen aikakauskirja* 2B: 201–357. <http://dx.doi.org/10.14214/ma.6242>
- Jaatinen, K., Fritze, H., Laine, J. & Laiho, R. 2007. Effects of short- and long-term water-level drawdown on the populations and activity of aerobic decomposers in a boreal peatland. *Global Change Biology* 13(2): 491–510. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01312.x>
- Jaatinen, K., Laiho, R., Vuorenmaa, A., del Castillo, U., Minkkinen, K., Pennanen, T., Penttilä, T. & Fritze, H. 2008. Responses of aerobic microbial communities and soil respiration to water-level drawdown in a northern boreal fen. *Environmental Microbiology* 10(2): 339–353. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01455.x>
- Joensuu, S., Ahti, E. & Vuollekoski, M. 2001. Long-term effects of maintaining ditch networks on runoff water quality. *Suo* 52(1): 17–28. ISSN 0039-5471 Saatavissa: <http://www.suo.fi/pdf/article9810.pdf>
- 2002. Effects of ditch network maintenance on the chemistry of run-off water from peatland forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17(3): 238–247. <https://doi.org/10.1080/028275802753742909>
- Kestävän metsätalouden määräaikainen rahoituslaki 34/2015. Annettu Helsingissä 23.1.2015.

- Koivusalo, H., Ahti, E., Laurén, A., Kokkonen, T., Karvonen, T., Nevalainen, R. & Finér, L. 2008. Impacts of ditch cleaning on hydrological processes in a drained peatland forest. *Hydrology and Earth System Science* 12: 1211–1227. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201707077665>
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Nevalainen, S., Pitkänen, J., Strandström, M. ja Viiri, H. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 59/2017. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 86 s.
- Kuzyakov, Y. & Cheng, W. 2001. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biology & Biochemistry* 33(14): 1915–1925. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00117-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00117-1)
- Laiho, R. & Laine, J. 1994. Nitrogen and phosphorus stores in peatlands drained for forestry in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9(1-4): 251–260. <https://doi.org/10.1080/02827589409382838>
- Laiho, R. & Finér, L. 1996. Changes in root biomass after water-level drawdown on pine mires in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11(1-4): 251–260. <https://doi.org/10.1080/02827589609382934>
- Laiho, R., Sallantausta, T. & Laine, J. 1999. The effect of forestry drainage on vertical distributions of major plant nutrients in peat soils. *Plant and Soil* 207(2): 169–181.
- Laiho, R., Vasander, H., Penttilä, T. & Laine, J. 2003. Dynamics of plant-mediated organic matter and nutrient cycling following water-level drawdown in boreal peatlands. *Global Biochemical Cycles* 17(2):1053. doi:10.1029/2002GB002015
- Laiho, R., Laine, J., Trettin, C. C. & Finér, L. 2004. Scots pine litter decomposition along drainage succession and soil nutrient gradients in peatland forests, and the effects of inter-annual weather variation. *Soil Biology & Biochemistry*: 36(7): 1095–1109. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.02.020>

- Laine, A. M., Byrne, K. A., Kiely, G. & Tuittila, E. 2009. The short-term effect of altered water level on carbon dioxide and methane fluxes in a blanket bog. *Suo* 60(3-4): 65–83.
- Laine, J. & Vasander, H. 1998. Suo ekosysteeminä. Teoksessa Vasander (toim.) Suomen suot 10–19.
- Laine, J. & Vasander, H. 2005. Suotyyppit ja niiden tunnistaminen. Metsäkustannus Oy. 110 s.
- Laine, J., Vasander, H. & Laiho, R. 1995. Long-term effects of water level drawdown on the vegetation of drained pine mires in southern Finland. *Journal of Applied Ecology* 32(4): 785-802. Saatavissa: <https://www.jstor.org/stable/2404818>
- Laine, J., Laiho, R., Minkkinen, K. & Vasander, H. 2006. Forestry and boreal peatlands. Julkaisussa: Wieder, R. K. & Vitt, D. H. (ed.) *Ecological Studies* 188: Boreal peatland ecosystems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. s. 331-357.
- Lauhanen, R. & Ahti, E. 2001. Effects of maintaining ditch networks on the development of scots pine stands. *Suo* 52(1): 29–38.
- Lieffers, V. J. & Rothwell, R. L. 1987a. Effects of drainage on substrate temperature and phenology of some trees and shrubs in an Alberta peatland. *Canadian Journal of Forest Research* 17(2): 97–104. <https://doi.org/10.1139/x87-019>
- Lieffers, V. J. & Rothwell, R. L. 1987b. Rooting of peatland black spruce and tamarack in relation to depth of water table. *Canadian Journal of Botany* 65(5): 817–821. <https://doi.org/10.1139/b87-111>
- Lloyd, D., Thomas, K.L., Benstead, J., Davies, K. L., Lloyd, S. H., Arah, J. R. M. & Stephen, K.D. 1998. Methanogenesis and CO<sub>2</sub> exchange in an ombrotrophic peat bog. *Atmospheric Environment* 32(19): 3229-3238. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00481-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00481-0)

- Lohila, A., Minkkinen, K., Aurela, M., Tuovinen, J., Penttilä, T., Ojanen, P. & Laurila, T. 2011. Greenhouse gas flux measurements in a forestry-drained peatland indicate a large carbon sink. *Biogeosciences* 8: 3202-3218. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3203-2011>
- Londo, A. J., Messina, M. G. & Schoenholtz, S. H. 1999. Forest harvesting effects on soil temperature, moisture, and respiration in a bottomland hardwood forest. *Soil Science Society of America Journal* 63(3):637-644. DOI:10.2136/sssaj1999.03615995006300030029x
- Martikainen, P. J., Nykänen, H., Alm, J. & Silvola, J. 1995. Change in fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophic. *Plant and Soil* 168(1): 571–577.
- Minkkinen, K. & Laine, J. 1996. Effect of forest drainage on the peat bulk density and carbon stores of Finnish mires. *Julkaisussa: Laiho, R., Laine, J. & Vasander, H. (ed.) Publications of the Academy of Finland 1/96: Northern peatlands in global climatic change. Edita, Helsinki. s. 236–241. Saatavissa: <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/458159#page=237>*
- Minkkinen, K. & Laine, J. 1998a. Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 28(9): 1267-1275. <https://doi.org/10.1139/x98-104>
- 1998b. Effect of forest drainage on the peat bulk density of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 28(2): 178–186. <https://doi.org/10.1139/x97-206>
- 2001. Turpeen käytön kasvihuonevaikutusten lisätutkimuskartoitus. Raportti, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Helsinki. 56 s.
- Minkkinen, K., Vasander, H., Jauhiainen, S., Karsisto, M. & Laine, J. 1999. Post-drainage changes in vegetation composition and carbon balance in Lakkasuo mire, central Finland. *Plant and Soil* 207(1): 107–120.

- Minkkinen, K., Korhonen, R., Savolainen, I. & Laine, J. 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900–2100 – the impact of forestry drainage. *Global Change Biology* 8(8): 785–799. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00504.x>
- Minkkinen, K., Laine, J. & Penttilä, T. 2007a. Kasvihuonekaasupäästöt metsäojitetuilta soilta ja niihin vaikuttavat ympäristötekijät. Julkaisussa: Sarkkola, S. (toim.). Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa. Tutkimusohjelman loppuraportti. Maa- ja metsätalousministeriö. s. 22–26.
- Minkkinen, K., Laine, J., Shurpali, N. J., Mäkiranta, P., Alm, J. & Penttilä, T. 2007b. Heterotrophic soil respiration in forestry-drained peatlands. *Boreal Environment Research* 12(2): 115-126.
- Minkkinen, K., Byrne, K. A., Trettin, C. 2008. Climate impacts of peatland forestry. Julkaisussa: Strack, M. (ed.). Peatlands and climate change. International Peat Society, Jyväskylä. s. 98-122. Saatavissa: <http://edepot.wur.nl/117602#page=109>
- Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J. & Lohila, A. 2018. Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences* 15(11): 3603–3624. <https://doi.org/10.5194/bg-15-3603-2018>
- Moore, T. & Knowles, R. 1989. The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science* 69(1): 33-38. <https://doi.org/10.4141/cjss89-004>
- Mäkiranta, P. 2003. Hakkuiden vaikutus metsäojitetun suon maahengitykseen. Pro gradu. Helsingin yliopisto.
- Mäkiranta, P., Laiho, R., Fritze, H., Hytönen, J., Laine, J. & Minkkinen, K. 2009. Indirect regulation of heterotrophic peat soil respiration by water level via microbial community structure and temperature sensitivity. *Soil Biology and Biochemistry* 41(4): 695-703. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.01.004>

- Mäkiranta, P., Riutta, T., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2010. Dynamics of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and heterotrophic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(12): 1585-1596. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.010>
- Mäkiranta, P., Laiho, R., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2012. The impact of logging residue on soil GHG fluxes in a drained peatland forest. *Soil Biology and Biochemistry* 48: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.01.005>
- Nieminen, M., Ahti, E., Koivusalo, H., Mattsson, T., Sarkkola, S. & Laurén, A. 2010. Export of suspended solids and dissolved elements from peatland areas after ditch network maintenance in south-central Finland. *Silva Fennica* 44(1): 39–49. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.161>
- Nieminen, M., Sallantausta, T., Ukonmaanaho, L., Nieminen, T. M. & Sarkkola, S. 2017. Nitrogen and phosphorus concentrations in discharge from drained peatland forests are increasing. *Science of the Total Environment* 609: 974-981. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.210>
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J. & Penttilä, T. 2010. Soil–atmosphere CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260(3): 411-421. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.036>
- Ojanen, P., Minkkinen, K. & Penttilä, T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201-208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.008>
- Paavilainen, E. & Päivänen, J. 1995. Peatland forestry: Ecology and Principles. *Ecological Studies* 111. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 248 s.
- Peltola, A. (toim.). 2004. Metsätilastollinen vuosikirja 2004. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa. 414 s.
- Peltola, A. (toim.). 2006. Metsätilastollinen vuosikirja 2006. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa. 438 s.

- Peltola, A. (toim.). 2014. Metsätilastollinen vuosikirja 2014. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa. 428 s.
- Päivänen, J. 1973. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Acta Forestalia Fennica* 129. 69 s.
- Päivänen, J. & Sarkkola, S. 2000. The effect of thinning and ditch network maintenance on the water table level in a scots pine stand on peat soil. *Suo* 51(3): 131–138. Saatavissa: <http://www.suo.fi/pdf/article9797.pdf>
- Saarnio, S., Morero, M., Shurpali, N. J., Tuittila, E., Mäkilä, M. & Alm, J. 2007. Annual CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes of pristine boreal mires as a background for the lifecycle analyses of peat energy. *Boreal Environment Research* 12(2): 101–113. Saatavissa: <http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber12/ber12-101.pdf>
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Koivusalo, H., Nieminen, M., Ahti, E., Päivänen, J. & Laine, J. 2010. Role of tree stand evapotranspiration in maintaining satisfactory drainage conditions in drained peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 40(8): 1485–1496. <https://doi.org/10.1139/X10-084>
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Ahti, E., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2012. Depth of water table prior to ditch network maintenance is a key factor for tree growth response. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(7): 649–658. <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.689004>
- Sarkkola, S., Nieminen, M., Koivusalo, H., Laurén, A., Ahti, E., Launiainen, S., Nikinmaa, E., Marttila, H., Laine, J. & Hökkä, H. 2013a. Domination of growing-season evapotranspiration over runoff makes ditch network maintenance in mature peatland forests questionable. *Mires and Peat* 11(2): 1–11.
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Jalkanen, R., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2013b. Kunnostus- ojitustarpeen arviointi tarkentuu – puuston määrä tärkeä ojituskriteeri. *Metsätieteen aikakauskirja* 2: 159–166. Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/532912/Sarkkola.pdf?sequence=1>

- Sevola, Y. 1997. Metsätilastollinen vuosikirja 1997. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa. 348 s.
- Sikström, U. & Hökkä, H. 2016. Interactions between soil water conditions and forest stands in boreal forests with implications for ditch network maintenance. *Silva Fennica* 50(1). 29 s. Saatavissa: <http://www.silvafennica.fi/article/1416>
- Silvola, J. 1986. Carbon dioxide dynamics in mires reclaimed for forestry in eastern Finland. *Annales Botanici Fennici* 23(1): 59–67.
- Silvola, J., Alm, J., Ahlholm, U., Nykanen, H. & Martikainen, P. J. 1996. CO<sub>2</sub> fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology* 84(2): 219–228.
- Strakova, P., Niemi, R., Freeman, C., Peltoniemi, K., Toberman, H., Heiskanen, I., Fritze, H. & Laiho, R. 2011. Litter type affects the activity of aerobic decomposers in a boreal peatland more than site nutrient and water table regimes. *Biogeosciences* 8: 2741–2755. <https://doi.org/10.5194/bg-8-2741-2011>
- Sullivan, B., Kolb, T., Hart, S., Kaye, J., Dore, S. & Montes-Helu, M. 2008. Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management* 255(12): 4047–4055. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.051>
- Svensson, B. H. & Sundh, I. 1992. Factors affecting methane production in peat soils. *Suo* 43(4-5): 183–190. Saatavissa: <http://www.suo.fi/pdf/article9701.pdf>
- Tang, J., Qi, Y., Xu, M., Misson, L. & Goldstein, A. H. 2005. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada. *Tree Physiology* 25(1): 57–66. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.1.57>
- WMO greenhouse gas bulletin 13: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2016. 2017. [Verkkojulkaisu] World Meteorological Organization. 8 s. [Viitattu 21.3.2019]



- Vanhatalo, K., Väisänen, P., Joensuu, S., Sved, J., Koistinen, A. & Äijälä, O. (toim.) 2015. Hyvän metsänhoidon suositukset - Suometsien hoito, työopas. Tapion julkaisuja. 105 s.
- Venäläinen, A., Rontu, L. & Solantie, R. 1999. On the influence of peatland draining on local climate. *Boreal Environment Research* 4:89–100. Saatavissa: <http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber4/ber4-089-100.pdf>
- Vuositilastot 2011–2014. 2013–2015. [www-sivusto] Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot> [Viitattu 19.3.2019]
- Zogg, G. P., Zak, D. R., Burton, A. J., Pregitzer, K. S. 1996. Fine root respiration in northern hardwood forests in relation to temperature and nitrogen availability. *Tree Physiology* 16(8): 719–725. <https://doi.org/10.1093/treephys/16.8.719>

# LIIKTEET

Liite 1. Hiilidioksidivuota kuvaavan lämpötilamallin parametritaulukko.

CO2-vuo = a × e <sup>b × T5</sup>									
Koeala	Pinta	Parametri	Estimaatti	Keskivirhe	t arvo	Pr(> t )	Merkitsevyys*	Jäännösvirhe	n
1	Kasvi	a	0,07488	0,02023	3,701	0,000382	***	0,1546	86
		b	0,1296	0,02025	6,4	8,43E-09	***		
1	Turve	a	0,06084	0,02205	2,759	0,00677	**	0,1906	114
		b	0,1116	0,02356	4,737	6,40E-06	***		
2	Kasvi	a	0,1501	0,02933	5,118	1,83E-06	***	0,1848	89
		b	0,08635	0,01349	6,401	7,56E-09	***		
2	Turve	a	0,140605	0,01771	7,939	8,65E-13	***	0,114	131
		b	0,068809	0,008736	7,876	1,21E-12	***		
3	Kasvi	a	0,12182	0,02344	5,196	1,35E-06	***	0,2112	88
		b	0,12176	0,01299	9,371	8,65E-15	***		
3	Turve	a	0,15955	0,0247	6,46	1,96E-09	***	0,152	131
		b	0,06692	0,01119	5,981	2,04E-08	***		
4	Kasvi	a	0,137665	0,016582	8,302	1,50E-12	***	0,1014	86
		b	0,087367	0,008259	10,579	< 2e-16	***		
4	Turve	a	0,110102	0,015541	7,085	8,30E-11	***	0,1087	130
		b	0,080894	0,009737	8,308	1,21E-13	***		
5	Kasvi	a	0,09758	0,013284	7,346	1,03E-10	***	0,09091	89
		b	0,100086	0,009258	10,811	< 2e-16	***		
5	Turve	a	0,10084	0,01149	8,78	8,54E-15	***	0,0757	131
		b	0,07754	0,00807	9,609	< 2e-16	***		
6	Kasvi	a	0,082741	0,011999	6,896	1,07E-09	***	0,09389	83
		b	0,097507	0,008504	11,466	< 2e-16	***		
6	Turve	a	0,05186	0,0109	4,76	5,83E-06	***	0,08039	114
		b	0,08321	0,01293	6,434	3,17E-09	***		
7	Kasvi	a	0,141092	0,016725	8,436	7,47E-13	***	0,1211	87
		b	0,086832	0,007422	11,699	< 2e-16	***		
7	Turve	a	0,08742	0,01459	5,991	2,07E-08	***	0,09633	127
		b	0,06631	0,01066	6,22	6,85E-09	***		
*) Merkitsevyystasot: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1									

Liite 2. Hiilidioksidivuota kuvaavan yhdistelmämallin parametritaulukko.

CO2-vuo = a × e <sup>b × T5</sup> + c × WT									
Koeala	Pinta	Parametri	Estimaatti	Keskivirhe	t arvo	Pr(> t )	Merkitsevyys*	Jäännösvirhe	n
1	Kasvi	a	0,0438743	0,016241	2,701	0,00841	**	0,1192	84
		b	0,1310059	0,0266357	4,918	4,50E-06	***		
		c	-0,0069303	0,0009002	-7,699	2,93E-11	***		
1	Turve	a	0,017964	0,013972	1,286	0,20131		0,1713	110
		b	0,152794	0,046086	3,315	0,00125	**		
		c	-0,005831	0,001048	-5,564	1,96E-07	***		
2	Kasvi	a	0,07477	0,030725	2,434	0,017125	*	0,1732	85
		b	0,104113	0,022929	4,541	1,90E-05	***		
		c	-0,00517	0,001292	-4,003	0,000137	***		
2	Turve	a	0,1009259	0,0202831	4,976	2,16E-06	***	0,1114	125
		b	0,0764172	0,0114845	6,654	8,58E-10	***		
		c	-0,0020402	0,0006814	-2,994	0,00333	**		
3	Kasvi	a	0,067965	0,021906	3,103	0,00264	**	0,1855	84
		b	0,133632	0,01863	7,173	3,12E-10	***		
		c	-0,005908	0,001205	-4,901	4,81E-06	***		
3	Turve	a	0,1128191	0,0266813	4,228	4,57E-05	***	0,1464	125
		b	0,0658632	0,0156454	4,21	4,92E-05	***		
		c	-0,0030162	0,0007591	-3,973	0,00012	***		
4	Kasvi	a	0,1134356	0,019968	5,681	2,15E-07	***	0,1009	82
		b	0,0912408	0,00998	9,142	5,13E-14	***		
		c	-0,0018617	0,0008378	-2,222	0,0291	*		
4	Turve	a	0,063254	0,0163464	3,87	0,000177	***	0,1029	124
		b	0,0964133	0,0144416	6,676	7,86E-10	***		
		c	-0,0028247	0,0006798	-4,155	6,09E-05	***		
5	Kasvi	a	0,1030806	0,0195488	5,273	1,12E-06	***	0,09285	83
		b	0,0962177	0,0105054	9,159	4,28E-14	***		
		c	-0,0001184	0,0008305	-0,143	0,887			
5	Turve	a	0,0769073	0,0149889	5,131	1,13E-06	***	0,07465	122
		b	0,0846976	0,0108979	7,772	3,06E-12	***		
		c	-0,0014011	0,0005503	-2,546	0,0122	*		
6	Kasvi	a	0,0713177	0,0132953	5,364	8,70E-07	***	0,09187	78
		b	0,1017525	0,0097731	10,412	3,24E-16	***		
		c	-0,0015238	0,0009457	-1,611	0,111			
6	Turve	a	0,0321026	0,0106496	3,014	0,003235	**	0,07677	107
		b	0,0926875	0,0181963	5,094	1,57E-06	***		
		c	-0,0026082	0,0006757	-3,86	0,000197	***		
7	Kasvi	a	0,170164	0,030587	5,563	3,59E-07	***	0,1217	81
		b	0,079875	0,008401	9,508	1,12E-14	***		
		c	0,001605	0,001746	0,919	0,361			
7	Turve	a	0,055255	0,019334	2,858	0,00506	**	0,09432	119
		b	0,081419	0,016492	4,937	2,68E-06	***		
		c	-0,002018	0,001092	-1,848	0,06719	.		
*)Merkitsevyystasot: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1									

Liite 3. Vuosittainen mitatun hetkellisen hiilidioksidivuon ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) keskiarvo sekä suurin ja pienin arvo  $R_{\text{TOT}}$  ja  $R_{\text{HET}}$  osalta.

Hetkellinen hiilidioksidivuo, $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$															
$R_{\text{TOT}}$	Keskiarvo					Maks.					Min.				
Koeala	2010	2011	2012	2013	2015	2010	2011	2012	2013	2015	2010	2011	2012	2013	2015
1	0,36	0,35	0,18	0,46	0,39	0,75	0,97	0,27	0,73	0,61	0,09	0,10	0,06	0,25	0,25
2	0,46	0,49	0,34	0,50	0,35	1,35	0,95	0,46	0,83	0,52	0,11	0,14	0,14	0,25	0,11
3	0,49	0,58	0,40	0,74	0,45	1,48	1,12	0,59	1,34	0,67	0,16	0,09	0,11	0,31	0,09
4	0,36	0,37	0,37	0,52	0,43	0,68	0,64	0,56	0,79	0,73	0,10	0,17	0,17	0,22	0,24
5	0,29	0,28	0,34	0,46	0,31	0,56	0,49	0,60	0,71	0,46	0,09	0,15	0,10	0,21	0,22
6	0,40	0,29	0,31	0,44	0,31	0,62	0,61	0,62	0,73	0,44	0,10	0,11	0,13	0,15	0,19
7	0,34	0,41	0,43	0,58	0,49	0,84	0,62	0,63	0,99	0,90	0,08	0,22	0,14	0,21	0,29
$R_{\text{HET}}$	Keskiarvo					Maks.					Min.				
Koeala	2010	2011	2012	2013	2015	2010	2011	2012	2013	2015	2010	2011	2012	2013	2015
1	0,45	0,30	0,12	0,33	0,25	1,28	1,04	0,25	0,61	0,40	0,07	0,07	0,03	0,12	0,09
2	0,38	0,37	0,30	0,34	0,24	0,85	0,62	0,45	0,59	0,36	0,14	0,12	0,10	0,10	0,10
3	0,41	0,45	0,30	0,34	0,29	0,87	0,96	0,54	0,75	0,52	0,14	0,14	0,12	0,15	0,13
4	0,33	0,31	0,27	0,35	0,27	0,66	0,64	0,47	0,65	0,42	0,12	0,11	0,10	0,13	0,15
5	0,26	0,25	0,27	0,29	0,23	0,56	0,40	0,48	0,53	0,42	0,14	0,07	0,09	0,14	0,11
6	0,22	0,14	0,13	0,21	0,18	0,39	0,31	0,33	0,44	0,41	0,08	0,03	0,01	0,06	0,06
7	0,22	0,24	0,21	0,22	0,18	0,62	0,45	0,48	0,46	0,41	0,06	0,09	0,07	0,07	0,08